



TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto
Sähköverkot ja suurjännitetekniikka

Markus Parviainen

**KESKIJÄNNITTEISESSÄ AVOJOHTOVERKOSSA
TAPAHTUNEIDEN VIKOJEN RIIPPUVUUS
YMPÄRISTÖOLOSUHTEISTA**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin
tutkintoa varten Espoossa 9.1.2008.

Työn valvoja: Professori Matti Lehtonen

Työn ohjaaja: TkT Pirjo Heine

Tekijä:	Markus Parviainen
Työn nimi:	Keskijännitteisessä avojohtoverkossa tapahtuneiden vikojen riippuvuus ympäristöolosuhteista
Päivämäärä: 9.1.2008	Sivumäärä: 72
Osasto: Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto	
Professori: S-18 Sähköverkot ja suurjännitetekniikka	
Työn valvoja: Professori Matti Lehtonen	
Työn ohjaaja: TkT Pirjo Heine	
<p>Lähivuosina verkkoyhtiöitä odottavat mittavat saneeraustoimenpiteet, kun enimmäkseen 1960- ja 1970-luvuilla rakennettujen jakeluverkkojen teknilliset pitoajat lähestyvät loppuaan. Perinteisesti jakeluverkko rakennettiin tuolloin avojohtoratkaisuna metsän keskelle. Verkon luotettavuus ei ollut yhtä tärkeää kuin nykyään. Nyky-yhteiskunnan kasvava tarve sähkön laadusta ja sen luotettavasta jakelusta näkyy valvovan viranomaisen regulaatiossa. Verkkoyhtiöitä sakotetaan yhä lyhyemmistä katkoksista. Sähkön jakelun luotettavuutta on pyrittävä parantamaan.</p> <p>Kaapeloinnin tai päällystettyjen johtimien käytön on todettu parantavan luotettavuutta. Haja-asutusalueella kulutus on pientä, sen jakaantuessa laajalle alueelle. Avojohto on toistaiseksi säilyttänyt asemansa taloudellisesti kannattavimpana ratkaisuna. Jakeluverkon luotettavuuteen vaikuttavat verkon käyttötapa, komponenttien kunto sekä ympäristöolosuhteet.</p> <p>Tämän diplomityön tarkoituksena on tarkastella ympäristöolosuhteiden vaikutusta vika- sekä jälleenkytkentäaajuuksiin. Verkon ympäristö jaotellaan metsään, tien varteen sekä avomaahan. Myös jakeluverkon korkeuden sekä vikataajuuden korrelaatiota tarkastellaan. Aineisto mahdollistaa myös ylijännitesuojauksen sekä verkon maadoitustavan vaikutuksen arvioimista verkon luotettavuuteen.</p> <p>Saatuja tuloksia voidaan hyödyntää esimerkiksi investointipäätöksissä sekä pysyvien vikojen nopeammassa paikallistamisessa. Verkkotietojärjestelmä on arvokas apuväline verkkoyhtiöille. Diplomityössä pohditaan, kuinka verkkotietojärjestelmää pystyttäisiin yhä tehokkaammin käyttämään luotettavuuden parantamiseksi.</p>	
Avainsanat: jakeluverkon luotettavuus, ympäristötekijät, verkkosuunnittelu, ylijännitesuojaus, verkon maadoitus	

Author:	Markus Parviainen
Name of the Thesis:	The Effect of Environmental Factors on Faults in Overhead Line Medium Voltage Power Systems
Date: 9 January 2008	Number of Pages: 72
Department: Department of Electrical and Communications Engineering	
Professorship: S-18 Power Systems and High Voltage Engineering	
Supervisor: Professor Matti Lehtonen	
Instructor: Pirjo Heine, Dr.Sc. (Tech.)	
<p>A massive renewal of the Finnish distribution networks will be required in the near future, as a major part of these networks, built in the 1960's and 1970's, begin to reach the end of their lifetime. The distribution networks were built in the middle of forests using overhead lines. The reliability of the network played less of a role than it does today. Modern society's growing need for quality electricity and its reliable distribution is reflected in the strict regulatory environment. Network companies have to pay more compensation for shorter interruptions in supply. Efforts should be made to improve the distribution of electricity.</p> <p>In terms of reliability, cables and covered conductors have been shown to improve the quality of supply. In rural areas, consumption is usually small-scale and it is distributed across a wide area. Thus far, the overhead line has maintained its status as the most economical solution in rural areas. In the case of the bare conductor, reliability of distribution is dependent on the way the network is used, the condition of the components and on environmental factors.</p> <p>This thesis examines the effect of environmental factors on permanent and temporary faults. The surrounding environment was divided into forest, roadside and open ground areas. Additionally, the effect of the height of the distribution network on failure rates is also considered. The data collected also make it possible to study how overvoltage protection and neutral earthing would affect reliability of the network.</p> <p>The results achieved can be used, for example, in investment decisions and locating the permanent faults more rapidly. Network Information Systems are valuable tools for network companies. In the end of the thesis, some proposal to improve the Network Information System has been made.</p>	
Keywords: distribution system reliability, environmental factors, network planning, overvoltage protection, neutral point connection	

ALKUSANAT

Diplomityö on toteutettu osana VOH (verkko-omaisuuden hallinta) –projektia. Kiitän mukana olleita yrityksiä (Helsingin Energia, Kainuun Energia ja Tekla) työn rahoituksesta.

Kiitokset sekä työn valvojalle professori Matti Lehtoselle sekä ohjaajalle TkT Pirjo Heinelle ideoista ja kommentteista työn aikana. Varsinkin Matti Lehtosen kiinnostus alaa kohtaan on motivoinut minua ponnistelemaan eteenpäin.

Kainuun Energia on ollut aktiivisesti mukana yhteistyössä. Haluan kiittää etenkin Jussi Niskasta ja Arvo Oikarista, joilta olen saanut kaiken tiedon, jota olen vain osannut kysyä.

Kiitos Sannalle kaikesta.

Espoossa 8.1.2008

SISÄLLYSLUETTELO

ALKUSANAT	III
SISÄLLYSLUETTELO	IV
KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET	VI
1 JOHDANTO	1
2 LÄHTÖKOHTA TUTKIMUKSEEN.....	3
2.1 TAUSTAA	3
2.2 AVOJOHTOVERKON OMINAISUUKSIA	4
2.3 YLIJÄNNITESUOJAUS.....	4
2.4 VERKON TÄHTIPISTEEN MAADOITUS	5
2.5 TUTKIMUKSESSA OLLEET SÄHKÖASEMAT	6
2.5.1 Sähköasema A	6
2.5.2 Sähköasema B.....	7
3 SÄHKÖNJAKELUN KESKEYTYKSET JA NIISTÄ AIHEUTUNUT HAITTA	8
3.1 LYHYET KESKEYTYKSET	8
3.2 PITKÄT KESKEYTYKSET	8
3.3 JÄLLEENKYTKENNÄT	8
3.4 JÄNNITEKUOPAT.....	9
3.5 KESKEYTYKSESTÄ AIHEUTUNUT HAITTA (KAH)	9
4 VIKOJEN LUONNE.....	11
4.1 VIKOJEN LUOKITTELU	11
4.1.1 Maasulku	11
4.1.2 Oikosulku.....	11
4.1.3 Maaikosulku	11
4.2 VIKOJEN SELVIÄMISTAPA.....	12
4.2.1 Selviämistapojen luokittelu	12
4.2.2 Selviämistapojen jaottelu.....	13
4.3 VIAT LÄHDÖITTÄIN	14
4.3.1 Lyhyet keskeytykset	14
4.3.2 Pitkät keskeytykset	17
4.4 VIKOJEN AIHEUTTAJAT	18
4.4.1 Yleistä.....	18
5 VIKOJEN AIHEUTTAJIEN LUOKITTELU.....	20
5.1 SALAMA	20
5.1.1 Salaman synty.....	20
5.1.2 Salamoiden aiheuttamat viat.....	20
5.1.3 Salamoiden esiintyminen.....	22
5.2 TUULI	23
5.3 LUMI / JÄÄ	24
5.4 ELÄIMET.....	25
5.5 TUNNISTAMINEN	26
5.5.1 Lyhyet keskeytykset	26
5.5.2 Pitkät keskeytykset	28
5.6 LYHYIDEN KESKEYTYSTEN AIHEUTTAJAT	28
5.6.1 Vikojen aiheuttajien tarkastelu	29
5.7 PYSYVIEN VIKOJEN AIHEUTTAJAT.....	30
6 YMPÄRISTÖTEKIJÄT	31
6.1 JAKELUVERKKO SUOMEN YMPÄRISTÖOLOSUHTEISSA	31

6.1.1	Metsä	31
6.1.2	Tienvarsi	31
6.1.3	Avomaa.....	32
6.2	JAKO YMPÄRISTÖTEKIJÖIHIN	32
6.2.1	Jaotteluperusteet	32
6.2.2	Arvioidut ympäristöolosuhteet sähköasemien lähdeillä	33
6.3	KORKEUS MERENPINNASTA	34
7	VIKOJEN RIIPPUVUUS YMPÄRISTÖSTÄ	36
7.1	SALAMA	36
7.1.1	Suorat iskut avomaalla.....	37
7.1.2	Suorat iskut tien varressa	38
7.1.3	Suorat iskut metsässä.....	40
7.1.4	Epäsuora salamanisku ja indusoitunut ylijännite	41
7.1.5	Salaman energia.....	42
7.1.6	Ylijännitesuojauksen vaikutus salaman aiheuttamiin vikamääriin	43
7.1.7	Salamoiden aiheuttamat lyhyet keskeytykset	46
7.1.8	Salamoiden aiheuttamat pysyvät viat	49
7.1.9	Korkeuden vaikutus salamoiden aiheuttamiin vikoihin.....	52
7.2	TUULI	52
7.2.1	Tuulen aiheuttamat pysyvät viat	52
7.2.2	Tuulen aiheuttamat lyhyet keskeytykset.....	53
7.2.3	Korkeuden vaikutus tuulen aiheuttamiin vikoihin.....	53
7.3	LUMI / JÄÄ.....	54
7.3.1	Lumen aiheuttamat pysyvät viat	54
7.3.2	Lumen aiheuttamat lyhyet keskeytykset.....	55
7.3.3	Korkeuden vaikutus lumen aiheuttamiin vikoihin.....	56
7.4	ELÄIMET.....	56
7.4.1	Eläinten aiheuttamat pysyvät viat	56
7.4.2	Eläinten aiheuttamat lyhyet keskeytykset.....	57
8	TULOSTEN HYÖDYNTÄMINEN	58
8.1	VERKKO-OMAISUUDEN HALLINTA	58
8.2	VIKATAAJUUS	59
8.3	VERKKOTIETOJÄRJESTELMÄ	62
8.3.1	Verkkotietojärjestelmän hyödyntäminen investointipäätöksissä	62
8.3.2	Vikapaikan nopeampi paikallistaminen	63
8.3.3	Tarvittavat lisäykset verkkotietojärjestelmään	63
8.4	ESIMERKKI INVESTOINTIVAIHTOEHTOJEN VERTAILUSTA	65
9	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	67
	LÄHTEET	70
	LIITE 1	73
	LIITE 2	74
	LIITE 3	75
	LIITE 4	76
	LIITE 5	77
	LIITE 6	78
	LIITE 7	79

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

a	vuosi
b	ulointen vaihejohdinten välinen etäisyys
c	pylvään ja puun korkeimman kohdan välinen etäisyys
d	salaman iskupaikan horisontaalinen etäisyys johdosta
h	pylvään korkeus
i	(salama)virta
j	johtokadun leveys
k	kerroin salamavirran etenemisnopeudelle purkauskanavassa (= 1.3)
K_{TOT}	kokonaiskustannukset
K_{inv}	investointikustannukset
K_{kesk}	keskeytyskustannukset
K_{kaytto}	käyttökustannukset
K_{huolto}	ylläpitokustannukset
s	salaman iskuetäisyys
t	aika
u	jännite
u_{ind}	indusoitunut jännite
W	energia
x	sähköisen varjon leveys
y	puun korkeus
Z	aaltoimpedanssi
Z_0	impedanssin dimension omaava vakio
$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon, \theta$	apukulmia

2-v	kaksivaiheinen
3-v	kolmivaiheinen
AJK	aikajälleenkytkentä
CIGRE	Kansainvälinen järjestö (Conseil International des Grands Réseaux Electriques)
Dyn	muuntajan kytkentäryhmä (yläjännitepuolella käämitykset ovat kytketty kolmioon ja alajännitepuolella tähteen, jossa on myös nollajohdin)

EMV	Energiamarkkinavirasto
JK	jälleenkytkentä
KAH	keskeytyksestä aiheutunut haitta
KAI	Kainuun Energia Oy (myös Kainuun Sähköverkko Oy)
KJ	keskijännite (tässä yhteydessä 20 kV)
km	kilometri (1000 metriä)
lkm	lukumäärä
mos	maaoikosulku
mpy	merenpinnan yläpuolella
os	oikosulku
PAS	päällystetty avojohto
PJK	pikajälleenkytkentä
RMS	tehollisarvo
Sener	Sähköenergialiitto ry
TKK	Teknillinen korkeakoulu
Tykkylumi	tykkylumi

1 JOHDANTO

Yhteiskunnan kasvava riippuvuus sähkön laadusta ja sen keskeytymättömästä jakelusta näkyy regulaatiomallissa, joka kiristyneenä entisestään tulevaisuudessa. Asiakkaille maksetaan mahdollisesti korvauksia jo lyhyemmistäkin katkoksista. Verkko-omaisuuden hallinta on keskeisessä asemassa jakeluverkkoyhtiöissä. Aiemmin investointikustannuksilla oli ratkaisevin rooli verkkosuunnittelussa, mutta regulaatiomallin kiristyminen lisää myös keskeytyskustannusten merkitystä investointipäätöksissä. Verkkoliiketoiminnan haasteena on tehostaa toimintaansa heikentämättä laatua.

Asiakkailla näkyvät lyhyet häiriöt ja pidemmät käyttökeskeytykset aiheutuvat yleensä jakeluverkossa tapahtuneista vioista. Monia tutkimuksia on tehty luotettavuuden parantamiseksi. Esimerkiksi jakeluverkon kaapeloinnin on kiistattomasti todettu vähentävän käyttökeskeytyksiä. Suomessa on kuitenkin paljon maaseutualuetta, jossa kulutus on pientä, sen jakaantuessa laajalle alueelle. Tämänkaltaisilla alueilla kaapelointi ei ainakaan toistaiseksi ole ollut taloudellisesti kannattavaa ja avojohtoja nähdään myös tulevaisuudessa jakeluverkoissa.

Perinteisesti sähköverkon jälleenkytkentä- ja vikataajuudet ovat olleet riippuvaisia verkon käyttötavasta, ympäristötekijöistä sekä komponenttien kunnosta. Tämän diplomityön pääpaino on tutkia vikojen riippuvuutta ympäristötekijöistä ja selvittää, miten vikojen aiheuttajat jakautuvat eri ympäristöihin. Käytetty aineisto mahdollistaa myös tarkastelun ylijännitesuojauksen sekä verkon tähtipisteen maadoittamisen vaikutuksista jälleenkytkentätaajuuksiin.

Diplomityön tarkoitus on löytää tietyn ympäristötekijän ja vian aiheuttajan välille riippuvuus. Mikäli riippuvuus löytyy, on tulosta mahdollista hyödyntää jakeluverkon suunnittelussa. Tällöin olisi karttapohjaa hyödyntävällä verkkosuunnitteluohjelmalla mahdollisuus vertailla eri investointivaihtoehtojen vika- ja jälleenkytkentätaajuuksia. Näin saataisiin tarkemmat arviot tulevaisuuden keskeytyskustannuksille. Myös vikapaikan etsintä nopeutuu, kun verkkotietojärjestelmästä havaitaan riskialttiit vikapaikat.

Kappale 2 pohjustaa diplomityötä esittelemällä tutkittuja jakeluverkkoja. Samalla kerrotaan ominaispiirteitä jakeluverkoista. Kappaleessa 3 pohditaan sekä lyhyiden että pitkien keskeytysten merkitystä. Kappale 4 tarkastelee kahdella sähköasemalla tapahtuneita vikoja ja pyrkii selvittämään tähtipisteen kompensoinnin sekä ylijännitesuojauksen merkitystä. Kappaleessa 5 jakeluverkon viat jaotellaan aiheuttajien kesken. Pääpaino on lyhyiden keskeytysten tarkastelussa. Kappaleessa 6 jaetaan molempien sähköasemien syöttämät lähdöt ympäristötekijöihin, jotka tässä diplomityössä ovat metsä, tienvarsi sekä avomaa. Myös maanpinnan korkeuden vaihteluja tutkitaan. Kappaleessa 7 tarkastellaan eri vikojen aiheuttajien vika- ja jälleenkytkentäaajuuksia. Lisäksi keskitytään salamoiden aiheuttamien vikojen teoreettiseen tarkasteluun. Kappaleessa 8 pohditaan tulosten hyödyntämismahdollisuuksia verkkotietojärjestelmässä.

Diplomityössä on hyödynnetty Kainuun Energia Oy:n (KAI) sekä Teknillisen korkeakoulun (TKK) välistä yhteistyötä vikojen analysoimisessa. Kyseinen yhteistyö alkoi vuonna 2002 ja jatkuu edelleen. Teknillisessä korkeakoulussa on analysoitu kahden Kainuun Energia Oy:n sähköaseman keskijännitelähdöillä tapahtuneita vikoja. Vikojen selvittämisessä on käytetty LEM Topas –sähkönlaatuanalysointia. Diplomityössä käytetyt säätiedot ovat peräisin Ilmatieteenlaitokselta ja sähköasemilta kerätyistä tiedoista.

2.2 Avojohtoverkon ominaisuuksia

Tutkimuksessa mukana olleille sähköasemille on yhteistä keskijännitteisen avojohtoverkon syöttäminen maaseutualueella. Maaseutualueella on tyypillistä pitkät etäisyydet kuormitusten välillä sekä yksittäisen kuorman pieni koko. Taloudellisesti ajateltuna tämänkaltaiselle alueelle paras ratkaisu on toistaiseksi ollut avojohdon käyttö. Suomen keskijänniteverkoista (1 - 45 kV) noin 85 % on edelleen avojohtoa [Ete 07]. Maaseutualueella toimivalla verkkoyhtiöllä avojohtojen osuus on vieläkin suurempi. Lähteen [Kan 07] tietojen perusteella saadaan laskettua KAI:n avojohtojen osuudeksi noin 94 %.

Kainuun Sähköverkko Oy:n jakeluverkoista arviolta 70 % sijaitsee metsässä [Kan 07], kun keskimäärin maaseutujakeluverkossa vastaava luku on 50 % [Ete 07]. Toisin kuin siirtoverkko, jakeluverkkoa ei tehdä puuvarmaksi. Nykyisin keskijännitteisen avojohtokadun leveys on noin 10 metriä [Loh 05]. Perustelu kapealle johtokadulle on puhtaasti taloudellinen. Jos jakeluverkko rakennettaisiin puuvarmaksi, maanomistajille maksettavat korvaukset olisivat mittavat.

Avojohtojen käyttöä puoltaa niiden edullisuus. Suomessa on useita alueita, joissa kuormitus on pientä. Tämänkaltaisilla alueilla avojohtoratkaisu on kaapelien tai PAS-johtojen nykyhintojen perusteella verkkoyhtiön kannalta taloudellisin vaihtoehto. Avojohtoon eristeenä toimii ilma, joka on palautuva eristysaine. Paljaiden johtimien heikkous on niiden vikaherkkyys.

2.3 Ylijännitesuojaus

Jakeluverkossa esiintyy pientaajuisia ylijännitteitä ja loivia, jyrkkiä sekä erittäin jyrkkiä transienttiylijännitteitä [Aro 03]. Jyrkkiä ylijännitteitä syntyy salamaniskuista sähköverkkoon. Avojohtoon salama pääsee iskemään vapaasti, kun taas kaapeliverkko on suoralta iskulta enemmän turvassa. Avojohtoverkon kalliit komponentit on suojattava ylijännitteitä vastaan. Ylijännitesuojaus voitaisiin toteuttaa siirtoverkon tapaan ukkosköysillä. Suomen maaperän epäedulliset maadoitusominaisuudet rajoittavat kuitenkin ukkosjohtimien käyttöä jakeluverkoissa [Elo 88]. Jakeluverkossa ukkosköysiä käytetään korkeintaan sähköasemalla lähtöjen läheisyydessä. Tärkeimpiä komponentteja, kuten jakelumuuntajia (20/0.4 kV), suojataan ylijännitesuojilla.

Standardin SFS 2646 mukaan jakelumuuntajan suojaamiseksi käytetään 200 kVA ja sitä suuremmissa tapauksissa ainoastaan venttiilisuoja. Venttiilisuojan toiminta perustuu epälineaariseen vastukseen. Ideaalisessa tilanteessa suoja muuttuu pieneksi vastukseksi ylijännitteen aikana ja purkaa sen energian. Toiminnan jälkeen venttiilisuoja palautuu johtamattomaan tilaan [Aro 03]. Maaseutuverkossa yhden jakelumuuntajan takana oleva kuorma ei usein ole kovin suuri, joten venttiilisuojaat ovat harvinaisia. Alle 200 kVA tapauksissa tutkimuksessa olleiden jakeluverkkojen ylijännitesuojauksessa käytettiin kipinävälejä sekä puoliventtiilisuoja, joista käytetään myös nimitystä yhdistelmäsuoja.

Kipinävälin käyttöä tukee sen halvempi hinta sekä vähäisempi huollon tarve. Kipinävälin toiminta on suunniteltu jyrkkiä transienttijännitteitä eli ilmastollisia ylijännitteitä vastaan [Aro 03]. Kipinävälin toiminta perustuu valokaareen, joka syntyy kipinävälin yli ylijännitteen sattuessa. Valokaaren sammuttaminen vaatii jälleenkytkennän. Jälleenkytkentöihin palataan myöhemmin. Kipinävälillinen ylijännitesuoja on altis turhille toiminnoille. Esimerkiksi lintu tai tuulen lennättämä oksa voi synnyttää valokaaren ja aiheuttaa turhan jälleenkytkennän. Kipinäväleihin asennetaankin lintupiikkejä, joilla pyritään välttämään tämänkaltaisia tilanteita. Puoliventtiilisuoja on kipinävälin ja venttiilisuojan yhdistelmä. Puoliventtiilisuojaossa venttiilisuojaosan ylilyöntijännite on verkon pääjännitettä suurempi.

Tarkasteltavan jakeluverkon alueella uusia jakelumuuntajia asennettaessa sekä vanhoja korvattaessa valitaan aina alle 200 kVA jakelumuuntajalle ylijännitesuojaksi puoliventtiilisuoja. Vaikka siis lähdön ylijännitesuojaustavaksi on määritetty kipinäväli, on mahdollista, että lähdöltä löytyy myös puoliventtiilisuoja. Niiden osuus kokonaismäärästä on kuitenkin niin pieni, että diplomityössä tähän ei ole kiinnitetty huomiota. Samoin lähdöillä voi olla jakelumuuntajia, joiden koko on yli 200 kVA. Näiden osuus tarkastelluista jakelumuuntajista on pieni, joten jako ylijännitesuojaustavasta on tehty ainoastaan kipinävälien sekä puoliventtiilisuojaisten kesken.

2.4 Verkon tähtipisteen maadoitus

Sähköverkon komponentin joutuessa maakosketukseen muodostuu vikapaikkaan maadoitusjännite. Se on riippuvainen vikavirran suuruudesta sekä

maadoitusresistanssista. Suomen alueella maadoitusominaisuudet eivät ole suotuisia, joten maadoitusjännite voi kasvaa suureksi. Tämä muodostaa vaaran ihmisille ja eläimille vikapaikan lähistöllä. Voimassaolevat sähköturvallisuusmääräykset määrittelevät kosketusjännitteen suuruuden, jota ei voida ylittää. Tähtipisteen kompensoinnilla voidaan vaikuttaa kosketusjännitteiden suuruuksiin.

Tähtipisteen käsittelyyn vaikuttavat muun muassa alueen maadoitusominaisuudet, kustannukset, releiden asettelu sekä haluttu sähkönjakelun luotettavuus. Suomessa avojohdolliset jakeluverkot on yleisesti maasta erotettuja, joiden etuna on pieni vikavirta maasulun aikana ja näin ollen pieni kosketusjännite. Tämänkaltaisessa verkkoratkaisussa tähtipistettä ei maadoiteta lainkaan. [Leh 96]

Alueilla, joilla maadoitusominaisuudet ovat erittäin huonot, joudutaan turvautumaan lisämaadoituksiin maadoitusresistanssin saamiseksi pieneksi. Vaihtoehtoinen tapa sähköturvallisuusmääräysten täyttymiseen on asentaa keskijänniteverkon tähtipisteen sekä maan väliin reaktori eli kela. Tällöin verkkoa kutsutaan sammutetuksi. Kapasitiivinen maasulkuvirta sekä kelan induktanssin läpikulkeva induktiivinen virta kumoavat toisensa, jolloin maasulkuvirta jää pieneksi. Verkon sammuttamisesta saadaan myös toinen hyöty; osa valokaarellisista maasuluista sammuu itseksensä, jolloin katkaisijatoimintoja ei tarvita [Leh 96]. Tämä parantaa sähkön laatua, kun jälleenkytkentöjen määrä vähenee.

2.5 Tutkimuksessa olleet sähköasemat

2.5.1 Sähköasema A

Sähköasema A on tähtipisteeltään maasta erotettu. Sähköasema syöttää viittä avojohtolähtöä, joiden yhteispituus on 199 km. Kolmella lähdöllä käytetään jakelumuuntajien ylijännitesuojauksessa kipinävälejä ja kahdella lähdöllä puoliventtiilisuojia. Jakelumuuntajia viidellä lähdöllä on 159 kappaletta. Sähköaseman A syöttämien lähtöjen tarkemmat tiedot löytyvät taulukosta 2.1.

Taulukko 2.1. Sähköaseman A tietoja. K=kipinäväli, P=puoliventtiilisuoja.

	Johtopituus [km]	Jakelumuuntajia [kpl]	Ylijännite- suojaus
Lähtö 1	38	29	K
Lähtö 2	31	30	P
Lähtö 3	23	21	K
Lähtö 4	70	52	P
Lähtö 5	36	27	K
yhteensä	199	159	

2.5.2 Sähköasema B

Sähköaseman B tähtipiste on kompensointikelalla maadoitettu. Yleisesti puhutaan sammutetusta verkosta. Sähköasemalla on kaksi 110/20 kV päämuuntajaa. Topas-analysaattori mittaa toisen päämuuntajan syöttämää keskijänniteverkkoa, johon kuuluu viisi johtolähtöä. Näiden yhteispituus on 747 km. Pienellä osalla lähdoistä on käytetty maakaapelia tai PAS-johdinta, mutta näiden osuus johtopituuksista on reilusti alle yhden prosentin, joten niitä ei oteta huomioon tarkastelussa.

Kolmella johtolähdöllä on ylijännitesuojina kipinäväliä sekä kahdella puoliventtiilisuoja. Lähdön 1 jakelumuuntajien ylijännitesuojaus vaihdettiin puoliventtiilisuojaiksi tarkasteluajan puolivälissä. Jakelumuuntajia Sähköaseman B syöttämässä verkossa on 488 kappaletta. Tarkemmat tiedot Sähköaseman B syöttämisestä lähdoistä löytyvät taulukosta 2.2.

Taulukko 2.2. Sähköaseman B tietoja. K=kipinäväli, P=puoliventtiilisuoja.

	Johtopituus [km]	Jakelumuuntajia [kpl]	Ylijännite- suojaus
Lähtö 1	205	119	K / P
Lähtö 2	79	61	K
Lähtö 3	180	116	P
Lähtö 4	48	61	K
Lähtö 5	236	131	K
yhteensä	747	488	

3 SÄHKÖNJAKELUN KESKEYTYKSET JA NIISTÄ AIHEUTUNUT HAITTA

Sähkö on nykypäivän kulutushyödyke, jolta asiakkaat odottavat hyvää laatua ja luotettavaa jakelua. Sähkönkäyttäjän kokemista keskeytyksistä noin 90 % aiheutuu keskijänniteverkossa tapahtuneista vioista [Ktm 06].

3.1 Lyhyet keskeytykset

Yleisesti suurin osa keskijänniteverkon keskeytyksistä, noin 90 % [Ktm 06], on lyhytkestoisia. Lyhyellä keskeytyksellä kuvataan tapahtumaa, jossa sähkönkäyttäjä kokee korkeintaan kolmen minuutin pituisen sähkökatkoksen. Tällöin vika saadaan selvitettyä jälleenkytkennöillä. Jatkossa puhuttaessa jälleenkytkennöistä, yhdistetään ne lyhyisiin keskeytyksiin ellei toisin mainita.

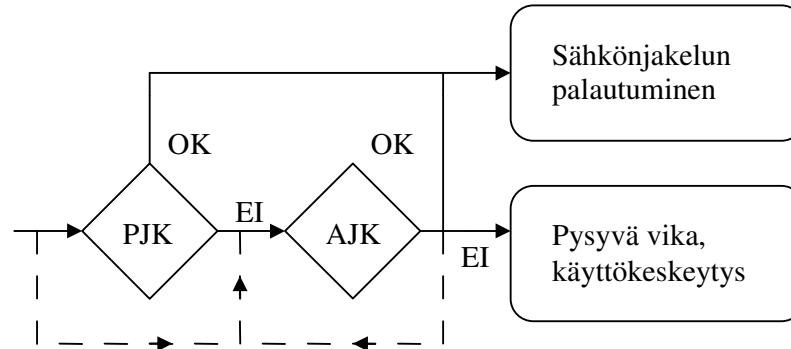
3.2 Pitkät keskeytykset

Jos asiakkaan kokema keskeytys sähkönjakelussa kestää yli kolme minuuttia, luokitellaan se pitkäksi keskeytykseksi. Pitkät keskeytykset voidaan jakaa vielä suunniteltuihin työkeskeytyksiin sekä vikakeskeytyksiin. Suunnitellut keskeytykset ovat asiakkaiden tiedossa ja ne johtuvat verkon kunnossapitotoimenpiteistä. Ne voidaan jakaa raivaukseen, verkon rakentamiseen, kunnossapitoon ja huoltoon sekä jakelurajoitukseen [Ete 05]. Suunnitellut keskeytykset eivät ole osa tätä diplomityötä, joten jatkossa puhuttaessa pitkistä keskeytyksistä tarkoitetaan niillä pelkästään vikakeskeytyksiä. Vikakeskeytys syntyy, kun jälleenkytkennöillä ei voida selvittää vikaa ja vika vaatii manuaalisen korjauksen.

3.3 Jälleenkytkennät

Vian tapahtuessa verkossa, se yritetään ensin selvittää pikajälleenkytkennällä (PJK). Kyseessä on toimenpide, jossa verkon osa tehdään hetkeksi, yleensä alle sekunniksi, jännitteettömäksi. Mikäli vika ei poistu kyseisenä aikana, seuraa aikajälleenkytkentä (AJK). Siinä käytetty jännitteetön aika on huomattavasti pitempi, yleensä noin minuutin. Sekä pika- että aikajälleenkytkentä näkyvät asiakkailla sähkön laadussa. Kuitenkin niillä saadaan monia vikoja selvitettyä, mikä puoltaa niiden käyttöä. Kuvassa 3.1 on esitetty

vian selvitysprosessi. Vikaa voidaan yrittää selvittää useammalla aikajälleenkytkennällä ennen kuin huoltomiestä lähetetään vikapaikalle. Myös pikajälleenkytkennän ohittaminen selvitysprosessissa on mahdollista.



Kuva 3.1. Vian selvityskaavio

3.4 Jännitekuopat

Standardi SFS-EN 50160 määrittelee jännitekuopaksi verkon jännitteiden alenemisen välillä 1 – 90 % nimellisarvosta. Jännitekuopan vaikutusalue voi tilanteesta riippuen olla suhteellisen laaja. Verkossa sattunut jälleenkytkentä voi aiheuttaa asiakkaiden kokeman jännitekuopan oman lähdön lisäksi myös naapurilähdöllä. Jakeluverkkoon siirtyy jännitekuoppia myös siirtoverkon kautta tai suurten moottoreiden käynnistyessä.

Symmetriset kolmivaiheiset jännitekuopat siirtyvät muuttumattomina jänniteportaiden välillä, kun taas epäsymmetrisissä tapauksissa tähän vaikuttaa muuntajan kytkentäryhmä. Suomessa jakelumuuntajien kytkentäryhmä on tyypillisesti Dyn11. Tällöin pienjännitepuolen vaihejännitteitä tarkasteltaessa on tutkittava keskijännitepuolen pääjännitteitä jännitekuoppien yhteydessä. Myös vikatyypin vaikutus pienjänniteverkkoon siirtävään jännitekuoppaan. Keskijänniteverkon yksivaiheinen maasulku ei näy pienjännitepuolen asiakkaalla, kun taas kaksivaiheinen oikosulku näkyy yhden vaiheen suurempana notkahduksena pienjännitepuolella. [Hei 06b]

3.5 Keskeytyksestä aiheutunut haitta (KAH)

Keskeytyksestä aiheutuu asiakkaalle mielipahaa ja joissain tilanteissa myös taloudellisia menetyksiä. Haitta on riippuvainen muun muassa kulutustehosta, kulutuskohteen tyypistä,

keskeytyksen kestosta sekä niiden lukumäärästä. On selvää, että yksityiselle kotitaloudelle minuutinkaan keskeytyksestä ei ole haittaa niin paljon kuin sähköriippuvaiselle prosessiteollisuudelle. Maaseutualueella on tyypillistä suhteellisen pieni kuorma yhden jakelumuuntajan takana. Mikäli verkon pysyvä vika saadaan rajattua mahdollisimman tarkasti, jää vain pieni määrä asiakkaita sähköttä.

Energiamarkkinavirasto (EMV) on julkaissut suuntaviivat seuraavalle valvontajaksolle 2008 - 2011 [Emv 07]. Taulukossa 3.1 on esitetty Energiamarkkinaviraston esittämät KAH-arvot asiakkaille näkyvistä keskeytyksistä vuoden 2005 hintatasossa. Kuten havaitaan, myös jälleenkytkennöille on asetettu KAH-arvot. Tulevaisuudessa KAH-arvot voivat vielä kasvaa, joten jakeluverkkoyhtiöissä on kiinnitettävä huomiota jälleenkytkentöjen vähentämiseen. Etenkin turhat jälleenkytkennät on minimoitava.

Taulukko 3.1. EMV:n asettamat KAH-arvot valvontajaksolle 2008 - 2011. [Emv 07]

Odottamaton keskeytys		Suunniteltu keskeytys		PJK	AJK
€/kW	€/kWh	€/kW	€/kWh	€/kW	€/kW
1,1	11,0	0,5	6,8	0,55	1,1

Jälleenkytkennöillä ja jännitekuopilla on yhteys toisiinsa. Perusteltua olisi, että jakeluverkkoyhtiöt maksaisivat korvauksia myös jännitekuopista. Niiden aiheuttamista haitoista ei kuitenkaan ole saatu vielä täyttä varmuutta. Lähteessä [Jus 02] on arvioitu jännitekuoppien, jossa jäännösjännite putoaa alle 60 %, vastaavan kustannuksiltaan pikajälleenkytkentää. Vastaavasti sitä loivemmat jännitekuopat vastaisivat puolta pikajälleenkytkennän aiheuttamista kustannuksista. Teollisuuden asiakkaille lyhytkestoinen jännitekuoppa voi myös olla haitallisempi kuin lyhyt keskeytys, jos alijännitesuojausta ei ole toteutettu kunnolla. Tällöin osa prosesseista voi jännitekuopan jälkeen olla vielä käynnissä, osan ollessa pysähtyneinä [Lem 94, Ala 06].

Asiakkaille näkyviä jännitekuoppia on kuitenkin vaikeampi seurata kuin jälleenkytkentöjä sekä pysyviä keskeytyksiä. Myös sillä, onko jakeluverkossa tapahtunut kaksi- vai kolmivaiheinen jännitekuoppa, on merkitystä. Ehkä näistä syistä uuteen valvontamalliin ei ole sisällytetty jännitekuoppien seurantaa, mutta tilanne voi olla toinen tulevaisuudessa.

4 VIKOJEN LUONNE

4.1 Vikojen luokittelu

4.1.1 Maasulku

Maasulku syntyy, kun jännitteisen osan sekä maan välille muodostuu joko suora tai välillinen yhteys. Aiemmin tarkasteltiin verkon tähtipisteen käsittelyn vaikutusta maasulkuvirtoihin. Tällöin todettiin, että jakeluverkossa sattuneen maasulun aiheuttama vikavirta on pieni. Vikaresistanssit sen sijaan ovat tapauskohtaisia, mikä aiheutuu vian aiheuttajasta. Esimerkiksi puun kaatuminen avojohdon päälle, tai johtimen katkeaminen kuorman puoleisen osan osuessa maahan, aiheuttaa yleensä suuren vikaresistanssin.

4.1.2 Oikosulku

Oikosulussa verkon eri vaiheet joutuvat joko suoraan tai välillisesti yhteyteen toisiinsa. Oikosulku on jakeluverkon kannalta aina vaarallisempi kuin maasulku, koska vikavirrat voivat nousta kymmenkertaisiksi kuormitusvirtoihin verrattuna. Haitallisin tilanne on jännitteisten osien suora kosketus toisiinsa, jolloin vikaresistanssi on lähes olematon. Oikosulku on myös asiakkaan kannalta haitallisempi kuin maasulku, sen aiheuttaman jännitekuopan takia. Oikosulku voi esiintyä kahden tai kolmen vaiheen välillä.

4.1.3 Maaosulku

Maaosulku on maasulun ja oikosulun yhdistelmä. Tällöin kaksi tai kolme vaihetta on oikosulussa ja sen lisäksi vielä yhteydessä maahan. Verkon kannalta ajateltuna ei oikosulun ja maaosulun vaarallisuudella ole juurikaan eroa. On muistettava, että maakosketus voi tietyssä tilanteissa aiheuttaa vaarajännitteitä ihmisille ja eläimille. Vika on siis tältä kannalta vaarallisempi kuin puhdas oikosulku.

4.2 Vikojen selviämistapa

4.2.1 Selviämistapojen luokittelu

Vian selviämistavat voidaan jakaa transientteihin (itsestään poistuviin), jälleenkytkentöihin sekä pysyviin. Transientit viat ovat pääasiassa maasulkuja. Tällöin vika katoaa ennen verkon suojausautomaation suorittamaa katkaisijatoimintoa. Transientit oikosulut ovat harvinaisia, koska oikosulussa syntynyt valokaari ei sammunut itseensä. Oikosulussa myös vikavirrat kasvavat suuriksi, jolloin relesuojaus toimii nopeammin.

Pikajälleenkytkennän jännitteetön aika vaihteli tutkimuksessa olleilla lähdöillä 400 - 800 ms välillä. Sähköaseman A yhdeltä lähdöltä pikajälleenkytkentä oli kokonaan poistettu. Aikajälleenkytkennässä jännitteetön aika on pitempi. Tutkituissa verkoissa se oli yhden minuutin luokkaa.

Tarkastelluissa jakeluverkoissa ilmeni tilanteita, joissa pikajälleenkytkentä selvitti vian, mutta verkon suojausautomaatio suoritti turhan aikajälleenkytkennän. Aikajälleenkytkentä johtunee ilmeisesti kytkentävirtasysäyksestä, jota suojaus pitää vikana. Koska kyseessä on verkon suojauksen virhe eikä vikatyypistä johtuva ominaisuus, merkittiin vian selvittäjäksi kyseisissä tapauksissa pikajälleenkytkentä.

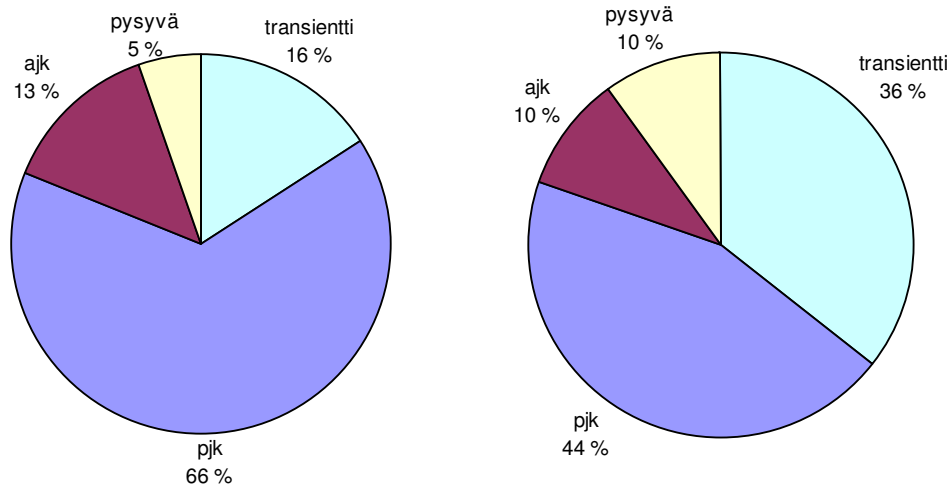
Turhien aikajälleenkytkentöjen osuus on huomattavan suuri. Kahdella sähköasemalla tapahtuneista aikajälleenkytkennöistä jopa yli kolmannes oli turhia. Turhia aikajälleenkytkentöjä voidaan poistaa sopivalla releasettelulla. Tämä toimenpide voi olla edessä monissa jakeluverkkoyhtiöissä, koska tulevaisuuden regulaatiomallit voivat sakottaa yhä ankarammin jälleenkytkennöistä.

Vika luetaan pysyväksi, jos se ei aikajälleenkytkennän avulla poistu verkosta. Joissain tilanteissa on mahdollista, että vikaa yritetään selvittää ensin usealla aikajälleenkytkennällä ennen kuin huoltoryhmä lähetetään vikapaikalle. Tässä tutkimuksessa kuitenkin vika katsottiin pysyväksi, mikäli se toistui ensimmäisen aikajälleenkytkennän jälkeen.

Kaikki viat eivät aiheuta katkaisijan toimintaa ja näin ollen sähkönjakelun keskeytystä. Tällöin joudutaan kuitenkin tekemään hallittu keskeytys. Nämä tilanteet on tässä diplomityössä luokiteltu pysyviksi vioiksi, koska ilman toimenpiteitä ne kehittyisivät pysyviksi vioiksi ajan kuluessa.

4.2.2 Selviämistapojen jaottelu

Jotta verkon tähtipisteen maadoituksen vaikutus näkyisi, on tarkasteluun otettu myös transientit eli ohimenevät viat. Yleisesti näitä ei vikaraportteihin liitetä. Niistä ei käytännössä ole haittaa, sillä asiakas ei niitä havaitse, eikä verkon komponentit niistä erityisemmin rasitu. Ilman transientteja vikoja vikojen selviämistavat ovat Sähköasemalla A: PJK (78 %), AJK (16 %) sekä pysyvät (6 %). Sähköasemalla B vastaavat lukemat tarkasteluajalta olivat PJK (70 %), AJK (15 %) sekä pysyvät (15 %).



Kuva 4.1. Kaikkien vikatapauksien selviäminen Sähköaseman A (vasemmalla) sekä Sähköaseman B (oikealla) lähdöillä.

Vertailemalla kahden eri sähköaseman lähtöjen vikojen selviämistapoja, havaitaan transienttien vikojen suuri osuus (36 %) Sähköaseman B vioista, kun vastaava osuus Sähköasemalla A on 16 %. Tämä vahvistaa teorian, jonka mukaan verkon kompensointi vähentää jälleenkytkentöjä verkossa.

Sähköasemalla B näyttäisi pysyvien vikojen osuus olevan suuri (15 %) jälleenkytkennän vaativista vioista luvun ollessa 6 % Sähköasemalla A. Sähköaseman B alueella

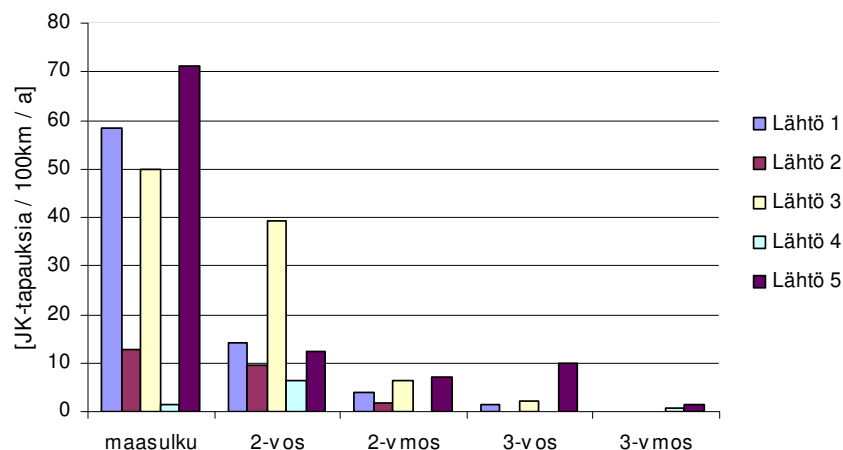
talviolosuhteet olivat vaikeat sähköverkolle talvella 2005 – 2006, kun taas Sähköaseman A lähdöt välttyivät tältä. Pelkästään tammikuussa 2006 tapahtui Sähköaseman B lähdöillä yhteensä 40 pysyvää vikaa vastaavan luvun ollessa samana vuonna 74. Sähköaseman A lähdöt välttyivät vaikeilta olosuhteilta, ja pysyviä vikoja tapahtuikin vain kaksi kyseisellä ajalla.

4.3 Viat lähdöittäin

Viat on analysoitu yksitellen virtojen ja jännitteiden RMS-arvojen käyttäytymisen perusteella. Monissa vikatilanteissa vika kehittyy tietystä vikatyypistä toiseksi. Tällöin on vikatyypiksi valittu se, joka on vallitseva juuri ennen katkaisijatoimintoa. Tarkasteltaessa johtojen jälleenkytkentä- ja vikataajuuksia, on järkevää käyttää yksikkönä ”tapahtumia/100 km/a”. Tällöin voidaan tarkastella eripituisten lähtöjen vika- sekä jälleenkytkentäalttiutta.

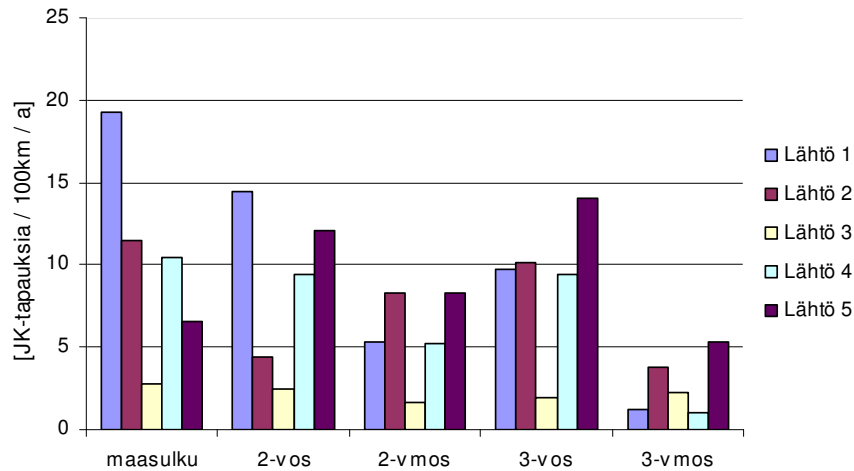
4.3.1 Lyhyet keskeytykset

Lyhyisiin keskeytyksiin johtaneet viat selvitetään aina jälleenkytkennöillä. Kuvassa 4.2 esitetään Sähköaseman A jälleenkytkentätaajuuudet vikatyypeittäin ja kuvassa 4.3 Sähköaseman B vastaavat arvot.



Kuva 4.2. Sähköaseman A jälleenkytkentätaajuuudet vikatyypeittäin

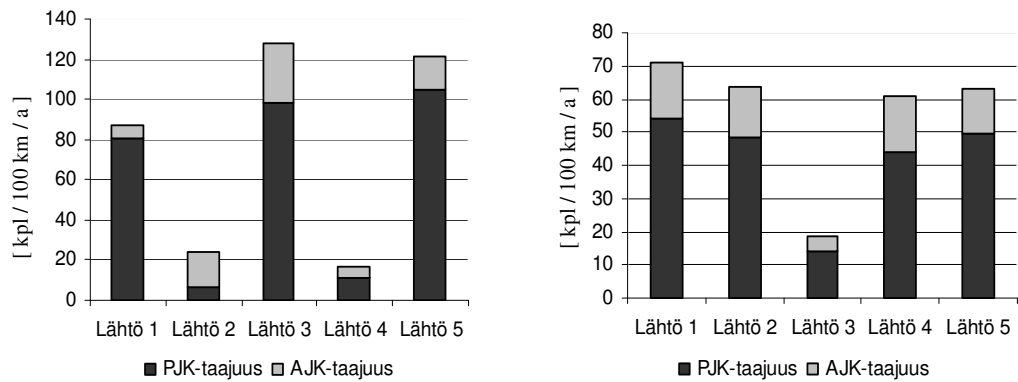
Sähköaseman A lähdöillä 2 ja 4 havaitaan suhteellisen vähän jälleenkytkentöjä vikatyypeittäin muihin lähtöihin verrattuna. Kuten sähköasemia esiteltäessä mainittiin, on kyseisten lähtöjen jakelumuuntajat suojattu puoliventtiilisuojin. Suurin ero havaitaan maasulkujen osuuksissa. Kipinävälit ovat herkkiä turhille toiminnoille. Jakelumuuntajiin on asennettu lintupiikkejä, mutta nekään eivät takaa turhien jälleenkytkentöjen häviämistä.



Kuva 4.3. Sähköaseman B jälleenkytkentätaajuuudet vikatyypeittäin

Sähköasemalla B jälleenkytkentätaajuuudet jakaantuvat tasaisemmin eri vikatyypeille verrattuna Sähköasemaan A. Vertailtaessa kahden sähköaseman JK-taajuuksia havaitaan huomattava ero maasulkujen aiheuttamien jälleenkytkentöjen välillä. Aiemmin todettiin Sähköaseman B tähtipisteen olevan kompensoitu, jolloin maasulkuvirrat jäävät pieneksi. Käytäntö näyttäisi vastaavan teoriaa siinä, että suurin osa maasuluista sammuu itsekseen ilman suojausautomaation toimintaa.

Kuvassa 4.4 on jaoteltu kummallakin sähköasemalla tapahtuneet jälleenkytkennät pika- sekä aikajälleenkytkentöihin. Tällä kertaa on huomioitu myös pysyvien vikojen yhteydessä tapahtuneet jälleenkytkennät. Tämä vaikuttaa enemmän Sähköaseman B jälleenkytkentätaajuuksiin, koska kyseisen aseman lähdöillä on tapahtunut suhteessa enemmän pysyviä vikoja. Edelleen turhat aikajälleenkytkennät on merkitty pikajälleenkytkennöiksi.



Kuva 4.4. Sähkösäseman A (vasemmalla) ja Sähkösäseman B (oikealla) lähtöjen jälleenkytkentätaajuudet

On esitetty, että verkon sammutus vähentäisi pikajälleenkytkentöjä noin puolella ja aikajälleenkytkentöjä neljänneksellä [Ver 05]. Taulukossa 4.1 on esitetty tämän tutkimuksen JK-taajuudet asemittain. Tällä kertaa pysyvistä vioista aiheutuneita jälleenkytkentöjä ei ole otettu huomioon, koska pysyvän vian sattuessa ei verkon maadoitustavalla ole merkitystä. Kahden sähkösäseman vertailussa sekä pika- että aikajälleenkytkennät ovat noin neljänneksen pienemmät Sähkösäseman B, jonka tähtipiste on kompensoitu.

Taulukko 4.1. Sähkösäsemanien jälleenkytkentätaajuudet

	Sähkösäsema A [kpl / 100km / a]	Sähkösäsema B [kpl / 100km / a]	Ero [%]
PJK	47.3	35.8	24.43
AJK	8.8	6.7	23.99
JK-taajuus	56.1	42.5	24.36

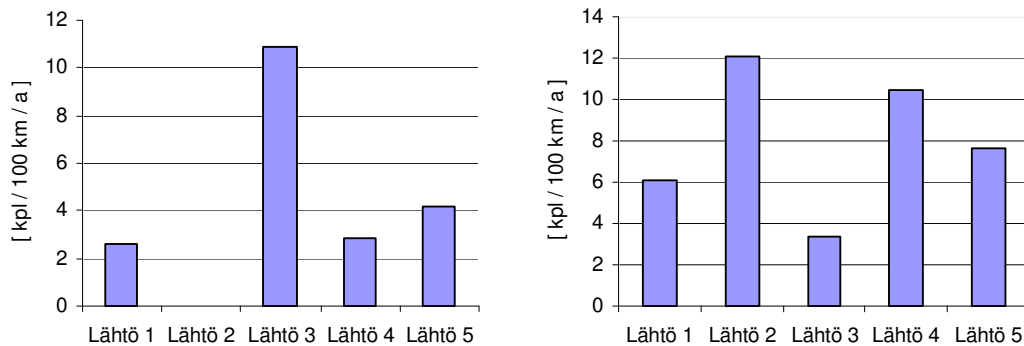
Verrattaessa kahden eri sähkösäseman JK-taajuuksia on syytä muistaa ympäristöolosuhteiden vaihtelu. Myös saman sähkösäseman eri lähtöjen välillä voi olla huomattavia eroja. Sähkösäseman A lähdön 4 jälleenkytkentätaajuudeksi saatiin 8.5 kpl/100 km/a, kun vastaava luku saman säseman lähdöllä 5 oli 101.7 kpl/100 km/a.

Tuloksista ei näin lyhyellä tarkastelujaksolla kannata tehdä suurempia johtopäätöksiä. Kuitenkin verkon sammutuksen ja jälleenkytkentöjen vähentymisen välillä on olemassa kiistaton yhteys. Toisaalta, jos lähdöllä esiintyy paljon oikosulkuja, esimerkiksi ukkosen aiheuttamana, on järkevää panostaa verkon ylijännitesuojaukseen. Sammuttamisella ei voida vaikuttaa suurten oikosulkuvirtojen aiheuttamiin jännitteenalennuksiin.

4.3.2 Pitkät keskeytykset

Pysyvien vikojen tarkastelussa ei ole järkevää lajitella vikoja vikatyypin mukaisesti lyhyiden keskeytysten tapaan. Vikatyyppi voi vaihdella monen eri vian välillä vikaprosessin aikana. Tutkimuksessa havaittiin pitkissä keskeytyksissä yleisimmän vikatyypin olevan kaksivaiheinen oikosulku

Kuvassa 4.5 on esitetty molempien sähköasemien pysyvien vikojen vikataajuudet tarkastelujaksolta. Kyseisissä vikataajuuksissa on otettu huomioon myös viat, jotka eivät aiheuta laukaisua. Toisin sanoen joudutaan tekemään hallittu keskeytys. Pysyviä vikoja, joita ei Topas-mittauksessa näy, on Sähköaseman A lähdöillä 2 kpl (14 %) sekä Sähköaseman B lähdöillä 51 kpl (50 %) kaikista pysyvistä vioista. Luvut voivat näin ollen olla suuria muihin vikatilastoihin verrattuna, koska niissä ei välttämättä ole otettu huomioon tapahtumia, joissa katkaisijatoimintoa ei tarvita. On kuitenkin perusteltua ottaa nekin huomioon, koska ilman toimenpiteitä ne ajan myötä voisivat aiheuttaa keskeytyksen.



Kuva 4.5. Sähköaseman A (vasemmalla) sekä Sähköaseman B (oikealla) pysyvien vikojen vikataajuudet

Sähköaseman A syöttämien lähtöjen keskimääräinen vikataajuus on 3.5 vikaa/100 km/a, luvun ollessa Sähköasemalla B 6.7 vikaa/100 km/a. Suhteellisen suuri ero selittyy ympäristötekijöillä, joihin palataan myöhemmin. Mielekkäämpää on tarkastella Sähköaseman B vikataajuuksia, koska Sähköaseman A lähtöjen pituudet ovat niin lyhyet, että sattumalla on merkittävä vaikutus tuloksiin.

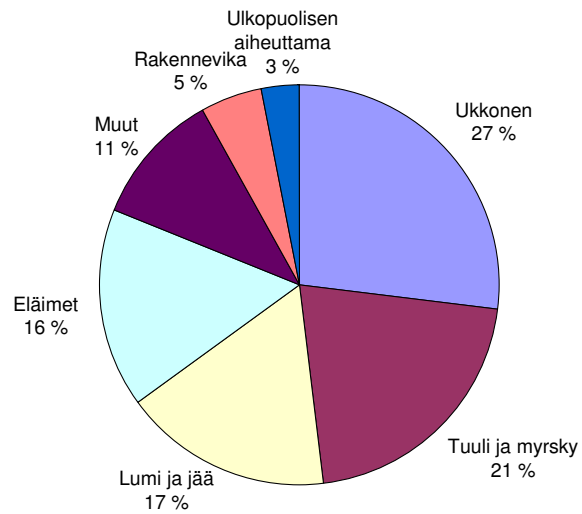
Lähteessä [Nis 03] tarkasteltiin KAI:n jakeluverkon vikataajuuksia 15 vuoden ajalta. Kokonaisvikataajuudeksi saatiin 3 vikaa/100 km/a. Kyseistä lukua ei ole mielekäästi verrata tässä tutkimuksessa saatuihin tuloksiin, koska vasta 2000-luvulla vikojen määriin on alettu kiinnittää huomiota. Aiemmin esimerkiksi hallittuja keskeytyksiä ei välttämättä ole merkitty vikatilastoihin.

4.4 Vikojen aiheuttajat

4.4.1 Yleistä

Pysyvien vikojen aiheuttajan selvittäminen on usein helppoa, sillä vian aiheuttajasta jää todiste vikapaikalle. Se voi olla avojohdon päälle tuulen tai metsätyöntekijän kaatama puu tai salaman rikkoma jakelumuuntaja. On kuitenkin tapauksia, jossa todisteet katoavat. Esimerkiksi pysyvän vian aiheuttanut eläin voi joutua petoeläimen viemäksi, jolloin vian syy jää tuntemattomaksi. Jakeluverkkoyhtiöt ovatkin alkaneet pitää tilastoa pysyvien vikojen aiheuttajista.

Lyhyiden keskeytysten aiheuttajan selvittäminen onkin paljon haastavampaa, koska todisteita vian aiheuttajasta ei välttämättä jää vikapaikalle, eikä niitä lähdetä muutenkaan etsimään. Jos vian aiheuttaja on ollut pieni eläin tai puun oksa, ovat ne usein palaneet vian aiheuttaman valokaaren myötä. Sener teki selvityksen [Sen 01] pikajälleenkytkentöjen aiheuttajista. Tutkimukseen osallistui 15 jakeluverkkoyhtiötä. Selvityksen perusteella pikajälleenkytkentöjen aiheuttajat saatiin luokiteltua kuvan 4.6 tapaan.



Kuva 4.6. Arvio PJK:den aiheuttajista. [Sen 01]

Kuvasta 4.6 havaitaan, että luonto aiheuttaa useimmat lyhyet keskeytykset sähköverkoissa. Diplomityössä on jaettu vikojen aiheuttajat seuraaviin luokkiin: salama, tuuli, lumi ja jää, eläimet sekä muut viat.

5 VIKOJEN AIHEUTTAJIEN LUOKITTELU

Tässä diplomityössä vikojen aiheuttajien tarkka analysointi on lopputuloksen kannalta tärkeää. Tietenkään täysin varmaan lopputulokseen on mahdoton päästä, varsinkaan lyhyiden keskeytysten tapauksessa. Vikojen aiheuttajilla on kuitenkin ominaisuuksia, joiden perusteella on mahdollista tehdä suhteellisen luotettavaa jaottelua. Seuraavassa on tarkasteltu neljän vikatyypin (salama, tuuli, lumi/jää sekä eläimet) aiheuttamien vikojen syntyä, niiden ominaisuuksia sekä esiintymisajankohtia. Tämän jälkeen esitetään jaotteluperusteet, joiden perusteella viat on luokiteltu aiheuttajien kesken. Vikojen aiheuttajia on etsitty ainoastaan jälleenkytkennän vaatineissa tapauksissa.

5.1 Salama

5.1.1 Salaman synty

Salamassa on kyse varausten jakautumisesta ilmakehän ja maanpinnan välillä. Ukkospilvessä negatiiviset ja positiiviset varaukset liikkuvat toisiaan vasten. Kun varaustiheys on kasvanut riittävän suureksi, pyrkii se purkautumaan joko pilvien tai maan ja pilven välillä. Maahan tulevista purkauksista 80 % on negatiivisia, eli lähtöisin negatiivisesta pilven osasta [Elo 88]. Salamalle on tyypillistä, että se mutkittelee ilmassa. Tämä johtuu paikallisten kentänvoimakkuuksien erosta. Salama pyrkii löytämään optimaalisen reitin maahan. Vasta 50 – 150 metrin päässä maasta selviää lopullinen iskupaikka. Purkauskanavan synnyttyä muodostuu vasta pääpurkaus maasta pilveen, jota voi myös seurata jälkipurkauksia. [Aro 03]

5.1.2 Salamoiden aiheuttamat viat

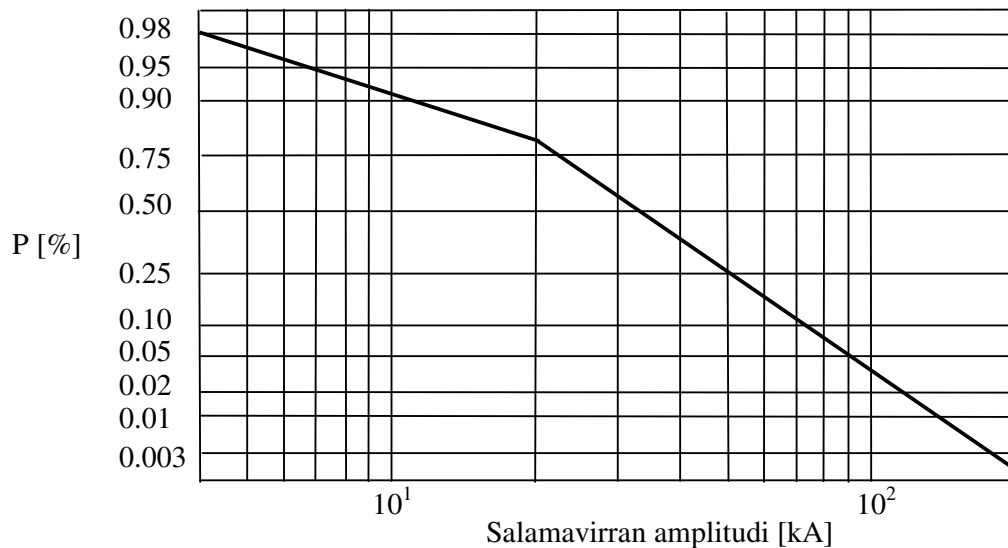
Salama voi aiheuttaa sähköverkkoon vikoja suoralla iskulla, takaiskulla tai iskemällä avojohdon lähelle ja indusoimalla tähän ylijännitteen. Takaiskussa salama iskee maadoitettuun osaan, josta se hyppää jännitteeseen osaan. Suomen jakeluverkossa pylväävät ovat maadoittamattomia ja ukkosjohtimia käytetään ainoastaan harvoissa tapauksissa suojaamaan sähköaseman lähellä olevia avojohtoja. Näin ollen määritelmän mukaisia takaiskuja ei tapahdu.

Salaman osuessa suoraan johtimiin, syntyy kahteen suuntaan lähtevä syöksyaalto. Jännite iskukohdassa on kaavan 5.1 mukainen. Salamavirran suuruus voi olla jopa yli 100 kA, mutta näin suuret salamavirrat ovat harvinaisia. Vuonna 2006 negatiivisten salamavirtojen keskiarvo oli 15.2 kA [Tuo 06]. Suorassa iskussa jännitteet kuitenkin nousevat miljooniin voltteihin. Kuvassa 5.1 on esitetty CIGRE:n suositus salamoiden esiintymistodennäköisyydestä salamavirran funktiona [Cig 91].

$$u = \frac{1}{2} i Z \quad (5.1)$$

i = salamavirran amplitudi

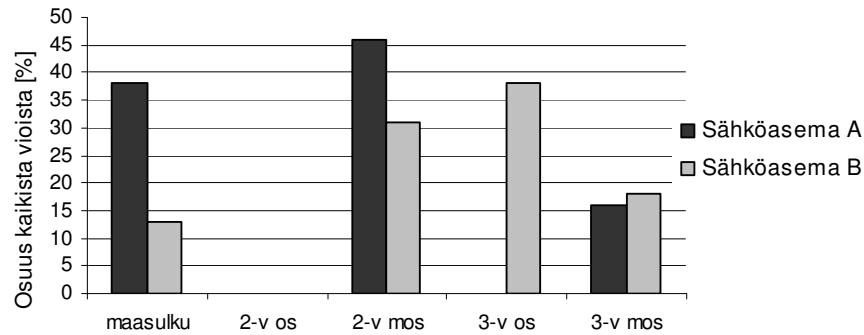
Z = vaihejohtimen aaltoimpedanssi



Kuva 5.1. Negatiivisten salamavirtojen amplitudin jakautuminen. [Cig 91]

Suora salamanisku aiheuttaa todennäköisimmin kolmivaiheisen (maa)oikosulun, sillä avojohtojen vaiheiden väliset etäisyydet toisistaan ovat niin pienet, että ilmapäli ei estä vikavirtaa hyppäämästä vaiheesta toiseen. Lähteessä [Hei 05] on tutkittu muutamien ukkosmyrskyjen aiheuttamia vikoja keskijänniteverkossa. Tulokset on esitetty kuvassa 5.2. Salamoiden aiheuttamat viat selvitetään usein pikajälleenkytkennöillä, jolloin virran aiheuttama valokaari ehtii sammua.

Indusoitunut ylijännite jää amplitudiltaan muutamiin satoihin kilovoltteihin. Näin ollen se ei muodosta yhtä suurta vaaraa kuin suora isku. Kuitenkin avojohdon lähelle lyövän salaman todennäköisyys on suurempi kuin suoran salamaniskun. Yleisimmät salamasta aiheutuneet viat ovat indusoituneita ylijännitteitä.

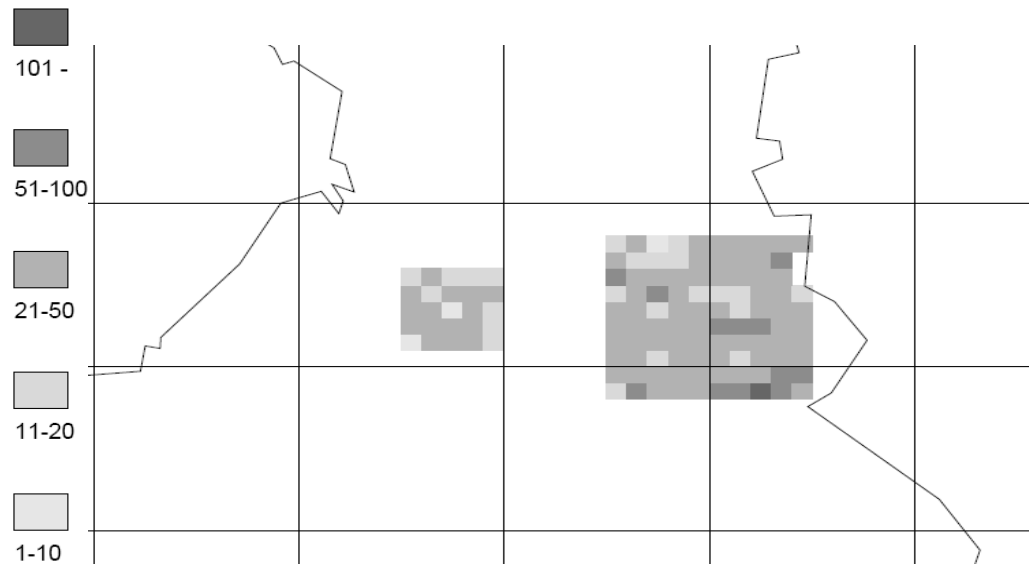


Kuva 5.2. Ukkosmyrskyjen aiheuttamia vikoja kahdella eri sähköasemalla. [Hei 05]

5.1.3 Salamoiden esiintyminen

Salamoista suurin osa esiintyy toukokuun ja syyskuun välillä [Tuo 06]. On mahdollista, että yksittäisiä salamoita esiintyy myös talvella, esimerkiksi räntäsateen yhteydessä. Tässä diplomityössä on kuitenkin oletettu, että salama aiheuttaa vikoja vain edellä mainitulla aikajaksolla.

Kuvassa 5.3 on esitetty salamamäärät kahden vuoden tarkastelujaksolla [Tuo 07]. Kuten havaitaan, esiintyvät salamat hyvin paikallisesti. Keskimäärin Sähkösäeman A alueella salamaniskutiheys oli 11 kpl/100 km²/a. Sähkösäeman B alueella luku oli 17kpl/100 km²/a. Tarkemmat salamaniskutiheydet on esitetty liitteessä 1.



Kuva 5.3. Paikannetut salamat / 100 km² kahden vuoden ajalta [Tuo 07]. Vasemmalla Sähkösäätämö A ja oikealla Sähkösäätämö B syöttämien lähtöjen likimääräiset sijainnit.

5.2 Tuuli

Sähkösäätämöiden säätietojen perusteella molemmilla asemilla tuulen keskinopeus on vuosittain 3 – 4 m/s välillä. Tällä voimakkuudella tuulen ei pitäisi aiheuttaa laajemmin vikoja. Lähteessä [Kan 07] on arvioitu, että tuulen keskinopeuden ollessa yli 5 m/s tai maksiminopeuden ollessa yli 8 m/s tunnin tarkasteluvälillä, tuuli kykenee aiheuttamaan vikoja.

Tuulen nopeus on riippuvainen ympäristöolosuhteista. Tuulen nopeus metsissä ei ole kovin suuri maaston aiheuttaman kitkan vuoksi. Sisämaassa kovimmat tuulet esiintyvät vaarojen lailla sekä laajoilla aukeilla, kuten pelloilla ja hakkuualueilla. Ilmastonmuutoksen vaikutusta sähköverkkojen käyttövarmuuteen on tutkittu. Asiantuntijoiden mukaan kovat tuulet sekä myrskyt lisääntyvät tulevaisuudessa, jolloin jakeluverkot on suunniteltava kestävämmän paremmin niitä [Loh 05].

Tuuli on erityisen haitallinen sähköverkon kannalta metsissä. Sen lisäksi, että tuuli heiluttaa läheisiä puita, lennättää se myös kauempaa irtonaisia oksia, jotka voivat aiheuttaa lyhyen keskeytyksen. Erityisen vaarallisia ovat pitkäkestoiset myrskyt, joissa tuulen nopeus nousee hetkellisesti jopa yli 20 m/s. Tällöin on vaarana, että avojohdon viereiset puut kaatuvat avojohdon päälle, mikä aiheuttaa pidemmän käyttökeskeytyksen.

Oletettavaa on, että tuulen lyhyen keskeytyksen aiheuttamat viat koostuvat eniten maasuluista sekä kaksivaiheisista oikosuluista. Maasulku syntyy esimerkiksi, kun tuulen voimasta puun oksa osuu avojohtoon. Kaksivaiheinen oikosulku voi syntyä puolestaan tuulen lennättämän risun myötä tai tuulen heilauttaman puun painaessa johtimet yhteen. Pysyvien vikojen vikatyypit riippuvat muun muassa avojohdon päälle kaatuneen puun painosta sekä avojohtojen sijoittelusta.

5.3 Lumi / jää

Suomen ilmastossa talvi kestää monia kuukausia. Kainuun alueella talvi voi kestää jopa kuusi kuukautta. Vuonna 2006 pysyvä lumi saapui jo marraskuun alussa. Keväisin suurin osa lumista lähtee viimeistään huhtikuun aikana. Tutkitulla alueella erityisesti tammi- ja helmikuu ovat aikaa, jolloin lämpötila voi laskea alle -30°C . Lähteen [Ktm 06] mukaan kova pakkanen voi aiheuttaa vikoja erottimille, katkaisijoille sekä suojalaitteille. Talvella tyypillisimmät vikojen aiheuttajat ovat avojohdolle lumen painamat puiden oksat tai kokonaan kaatuneet puut.

Erityisen ongelman muodostaa tykkylumi (tykky), joka on syntynyt lumihiutaleista sekä kiinteässä olomuodossa olevasta vedestä eli jäästä. Tykky syntyy, kun ilmassa on paljon kosteutta, kuten sumua. Ilmiöön liittyy myös fysikaalinen tarttumismekanismi, jossa vesi kiinnittyy puihin. Tykkylumi voidaan jakaa huurre- sekä nuoskatykkyy. Huurretykky on syntynyt huurrekertymistä, eli pilven ja sumun vesipisaroista tai lumihiutaleista ja jääkiteistä. Nuoskatykky on lumen sekä vesisateen yhteisestä vaikutuksesta syntynyt tarttumiskykyinen lumiseos. Tykkylumi muodostuu erityisen ongelmalliseksi, kun ilman lämpötila laskee pakkasen puolelle ja lumimassa jäätyy. [Hop 05]

Kertynyt tykkylumi voi painaa avojohtoa niin paljon alaspäin, että se joutuu kosketuksiin avojohdon alla sijaitsevan aluskasvillisuuden kanssa. Ensilumi saattaa olla vaarallinen sähköverkon kannalta, koska puusto ei ole vielä tottunut lumen painoon. Erityisesti lehtipuut ovat herkkiä taipumaan lumen painamina. Tykkylumi voi katkaista johtimia tai jopa orsia, kuten kuvasta 5.4 nähdään. Etenkään vanhat puuorret eivät kestä paljoa mekaanista rasitusta.



Kuva 5.4. Tykkylumen painosta katkennut orsi. Kuva Markus Keränen

Tykkylumen esiintyminen vaihtelee alueittain. Tykkylumi ei välttämättä ole jokavuotinen ilmiö, sillä aina ei siihen vaadittavia olosuhteita synny. Tammikuussa 2006 esiintyi Sähköaseman B alueella paljon tykkylumesta aiheutuneita vikoja. Samaan aikaan Sähköasemalla A ei esiintynyt yhtään vikaa, joka olisi johtunut tykkylumesta. Kyseisen ajanjakson aikana esiintyneistä jakeluverkon vioista suurin osa oli kaksivaiheisia oikosulkuja, kun normaalisti talvella esiintyy eniten maasulkuja. [Hei 06a]

5.4 Eläimet

Pohjolan kylmät talvet pakottavat monet linnut lähtemään talven viettoon lämpimille alueille. Massiivisia muuttoja tapahtuu keväisin ja syksyisin. Erityisesti suurilla linnuilla, kuten hanhilla ja joutsenilla, siipiväli on riittävän suuri aiheuttamaan oikosulun kahden vaiheen välille. Myös pienemmät linnut ja oravat voivat aiheuttaa vikoja. Tyypillisiä paikkoja ovat pylväsmuuntajat, joissa vaihevälit väistämättä pienenevät muuntajan fyysisen koon myötä. Jopa pienet linnut ja oravat voivat aiheuttaa oikosulun. Pylväsmuuntajilla on järkevää käyttää päällystettyjä johtimia sekä suojata läpiviennit eristävillä suojahatuilla.

Lähteessä [Cho 95] tutkittiin pieneläinten vaikutusta jakeluverkolle. Havaittiin, että pieneläimet liikkuvat eniten valoisan aikaan, hyvällä säällä. Esimerkiksi ukkosmyrskyjen, kovien tuulien sekä vesi- ja lumisateiden aikana eläinten aiheuttamia vikoja ei ollut juuri

lainkaan. Eläimet liikkuvat pääasiassa päiväsaikaan, jolloin on valoisaa. Varsinkin auringon nousun ja laskun aikaan liikkuminen on vilkkainta ravintoa etsiessä.

Eläinten aiheuttamat vikataajuudet vaihtelevat paikoittain hyvin paljon. Tutkimuksessa [Fra 96] kävi ilmi, että jollain alueella eläimet voivat aiheuttaa 80 - 90 % kaikista vioista, kun taas saman lähdön muilla alueilla luku on huomattavasti pienempi. Näin ollen ei välttämättä ole järkevää arvioida eläinten aiheuttamia vikatiheyksiä lähdöittäin, vaan jakaa viat ympäristöolosuhteiden perusteella.

5.5 Tunnistaminen

5.5.1 Lyhyet keskeytykset

Lyhyen käyttökeskeytyksen aiheuttajien tunnistamista helpottaa tieto siitä, että vikatekijät ovat riippuvaisia vuodenajasta. Tunnistaminen on aloitettu talvesta (marraskuu – huhtikuu), jolloin voidaan olettaa, että lumi ja jää ovat todennäköisimmät vikojen aiheuttajat. Talvella aiheutuu muitakin vikoja, joten pieni osa vioista on arvioitu eläinten, tuulen ja tuntemattomien syiden aiheuttamiksi.

Keväisin (huhtikuu – toukokuu) ja syksyisin (elokuu – lokakuu) on lintujen muuttokausi vilkkaimmillaan, joten tällöin viat on merkitty eläinten aiheuttamiksi, jos salamoita ei ole esiintynyt ja tuulikin on ollut tyyntä. Eläimille on tyypillistä liikkuminen aamu- ja iltapäiväaikaan. Tunnistamisessa vika on määriteltävä eläimen aiheuttamaksi, jos se on tapahtunut aikavälillä 06:00 – 21:00. Osa päivällä tapahtuneista vioista on merkitty tuntemattomaksi.

Salamatiedot on kerätty Ilmatieteenlaitoksen maasalamapaikantimien havaitsemista salamoiden osaiskuista eri vuorokausina. Mikäli sähköasemien lähtöjen läheisyydessä on salamoinut vian tapahtumisaikana, on vian aiheuttajaksi merkitty salama.

Molemmilla sähköasemilla mitataan tuulen nopeuksia ja ilmoitetaan ne kymmenen minuutin keskiarvoina. Mikäli tuulen nopeus on ollut tunnin aikana yli määritellyn rajan, on vian aiheuttajaksi todettu tuuli. Tunnistamisessa kohdataan ongelma ukkosmyrskyjen aikaan, jolloin tuuli voi paikoitellen voimistua rajuksikin. Tällöin on vaikea tietää, onko vian aiheuttanut salama vai tuuli. Osa ukkosmyrskyjen aikana tapahtuneista maasuluista

sekä kaksivaiheiset oikosulut on merkitty tuulen aiheuttamiksi, jos tuulen nopeus on ollut yli määriteltyjen rajojen.

Sähköasemilta saadut säätiedot ovat suuri apu vikojen aiheuttajien tunnistamisessa. Kuitenkin ongelmaksi muodostuvat etäisyydet, varsinkin Sähköasemalla B, jossa avojohtolähdöt ovat pitkiä. Enimmillään etäisyys säätietojen mittauspisteen ja lähdön lopun välillä voi olla lähes sata kilometriä. Säätietoja onkin pyritty tarkastelemaan tunnin aikavälillä, jolloin mahdolliset säärintamien etenemiset on paremmin havaittavissa. Taulukossa 5.1 on esitetty lyhyesti kunkin aiheuttajan ominaisuuksia.

Taulukko 5.1. Vikojen tunnistamisprosessissa apuna käytetyt aiheuttajien ominaispiirteet

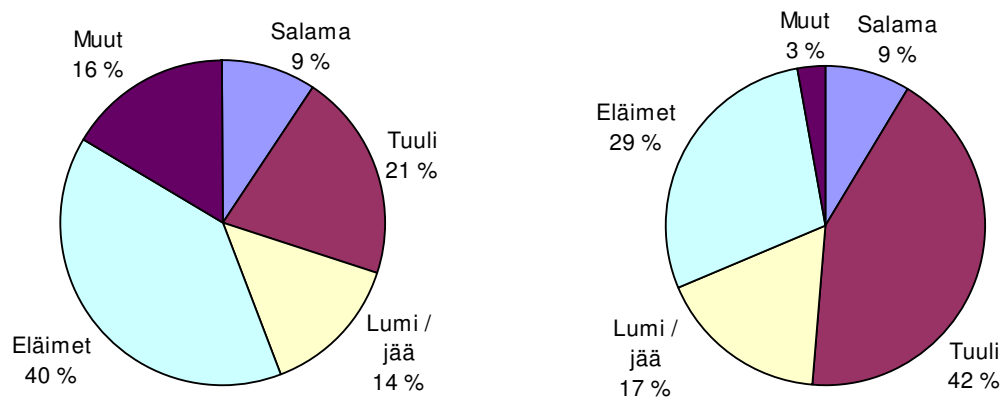
AIHEUTTAJA	Säätiedot	Vuodenaika	Vuorokaudenaika	Vikatyyppi
Salama	Ilmatieteenlaitoksen tilastoja	Toukokuu - Syyskuu	Enimmäkseen välillä 10:00 – 21:00 [Tuo 06]	Suora isku aiheuttaa 3-v oikosulun. Indusoituneen ylijännitteen aiheuttama vika riippuu monesta tekijästä
Tuuli	Tuulen keskinopeus > 5 m/s Tuulen max. nopeus > 8 m/s	Kaikki mahdollista	Kaikki mahdollista	Useimmiten 2-v oikosulku tai maasulku. Myös muut vikatyypit mahdollisia
Lumi ja jää	Kaikki mahdollista. Kuitenkin lumi painavimmillaan 0°C tienoilla, varsinkin kun tätä seuraa pakkanen	Marraskuu - Huhtikuu	Kaikki mahdollista	2-v oikosulku sekä maasulku yleisempiä. Muut vikatyypit harvinaisempia
Eläimet	Eläinten liikkuminen rauhallisempaa myrskyjen sekä vesi- ja lumisateiden aikana.	Kaikki mahdollista. Kuitenkin kevät ja syys vilkkainta aikaa varsinkin muuttolintujen takia	Eläinten liikkuminen vilkkainta valoisan ajan alussa ja lopussa. Aikavälillä 06:00 – 21:00 eläimet pääasiallisia aiheuttajia.	Maasulku ja 2-v oikosulku yleisimpiä

5.5.2 Pitkät keskeytykset

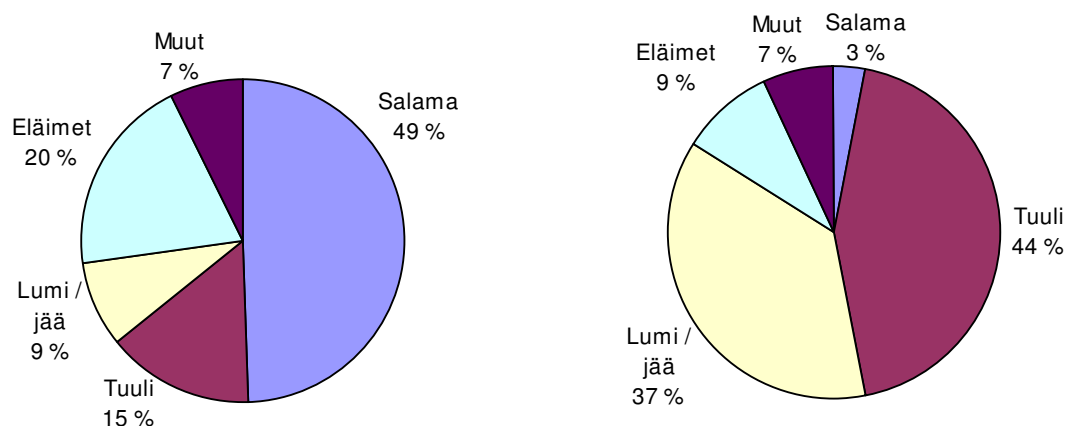
Mikäli vika on ollut pysyvä, on silloin vian aiheuttajasta usein jäänyt todiste. Kainuun Energialla pysyvien vikojen aiheuttajat pyritään analysoimaan huoltomiesten toimesta vian korjauksen yhteydessä. Mikäli vialle ei ole löytynyt järkevää selitystä, on syyksi määriteltä tuntematon. Joissain tapauksissa vian aiheuttajaksi on merkitty esimerkiksi ”puu linjassa”, ilman vian aiheuttajaa. Tällöin on tarkasteltu sääolosuhteita lyhyiden keskeytysten tapaan.

5.6 Lyhyiden keskeytysten aiheuttajat

Lyhyiden keskeytysten aiheuttajat on jaoteltu pika- sekä aikajälleenkytkennän selvittämiin tapauksiin. Tulokset esitetään kuvissa 5.5 sekä 5.6. Eroavaisuuksia löytyy niin pikajälleenkytkentöjen ja aikajälleenkytkentöjen aiheuttajien välillä kuin asemakohtaisesti tarkasteltuna.



Kuva 5.5. Sähkösaman A lähtöjen lyhyiden keskeytysten aiheuttajat. PJK vasemmalla sekä AJK oikealla



Kuva 5.6. Sähkösäman B lähtöjen lyhyiden keskeytysten aiheuttajat. PJK vasemmalla sekä AJK oikealla

5.6.1 Vikojen aiheuttajien tarkastelu

Kun verrataan saatuja tuloksia Senerin tekemään tutkimukseen [Sen 01] (kuva 4.6), havaitaan Sähkösäman A kohdalta eroja pikajälleenkytkentöjen selvittämien vikojen aiheuttajissa. Suurin eroavaisuus on havaittavissa salamoiden ja eläinten aiheuttamissa vioissa. Selitys salamoiden aiheuttamien vikojen pienelle osuudelle selittyy tarkastelemalla kuvaa 5.3. Sähkösäman A alueella paikannettiin huomattavasti vähemmän salamoita kuin Sähkösäman B alueella. Sähkösäman B tapauksessa tulokset vastaavat Senerin tutkimusta.

Salamoiden aiheuttamat viat selviävät yleensä pikajälleenkytkennällä, joka sammuttaa valokaaren. Kuitenkin molemmilla sähkösämailla salamat ovat aiheuttaneet myös aikajälleenkytkentöjä. Tämä selittyy verkon suojausautomaation toiminnasta. Peräkkäisten vikatapahtumien osuessa lähdölle, suoritetaan jälkimmäisen vian kohdalla suoraan aikajälleenkytkentä. Tällä säästetään komponentteja suurten vikavirtojen peräkkäiseltä rasitukselta. Varsinkin ukkosmyrskyjen aikana vikoja esiintyy usein lyhyellä aikavälillä.

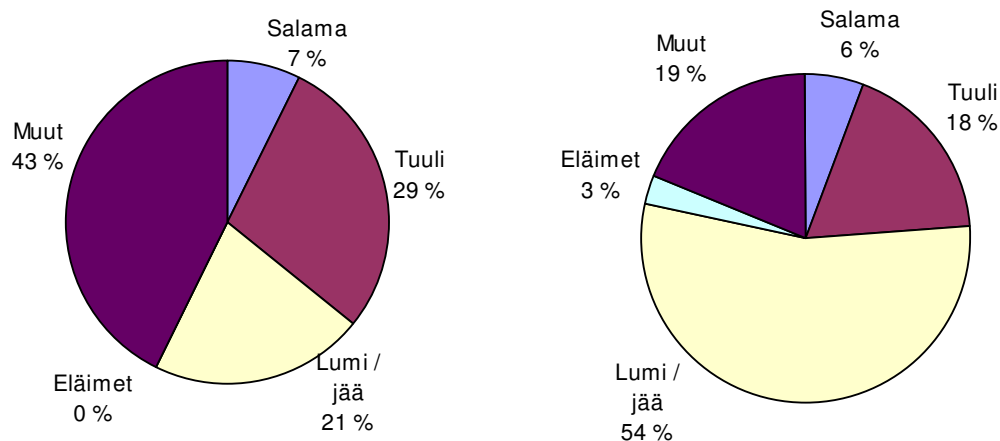
Sähkösäman A 205 jälleenkytkentätapauksista puolet (102 kpl) tapahtui syksyllä (elokuu – lokakuu), mikä vahvistaa käsitystä eläinten aiheuttamien vikojen suuresta osuudesta. Tälle ajanjaksolle osuu lintujen syysmuutto. Oletettavaa olisi, että lintujen muutto aiheuttaisi lukuisia vikoja myös keväällä (huhtikuu – toukokuu). Syksyisin muuttoon osallistuu kuitenkin huomattavasti enemmän lintuja, sillä onhan silloin kesän

jälkeläisetkin mukana muuttamassa. Sähkösäntan B 567 jälleenkytkennästä noin 53 % (301 kpl) tapahtui kesällä (kesäkuu – elokuu), mikä puoltaa ajatusta, että salamat aiheuttavat sähkösäntan lähdeillä eniten lyhyitä keskeytyksiä.

Tarkasteltaessa vikoja, jotka poistuvat vasta aikajälleenkytkennöillä, havaitaan odotetusti tuulen sekä lumen ja jään merkittävä osuus. Sähkösäntalla B jopa 81 % aikajälleenkytkennöistä aiheutui kyseisten tekijöiden aiheuttamista vioista. Sähkösäntalla A eläinten osuus on suhteellisen suuri (29 %). Lukua nostaa lumen ja jään aiheuttamien vikojen pieni osuus. Kuten aiemmin mainittua, kyseisen sähkösäntan lähdeillä talven olosuhteet eivät olleet tarkastelujaksolla sähköverkolle haitallisia.

5.7 Pysyvien vikojen aiheuttajat

Kuvassa 5.7 on esitetty molempien sähkösäntien pysyvien vikojen aiheuttajat. Molemmilla sähkösäntalla puut aiheuttavat eniten vikoja lumen ja tuulen vaikutuksesta. Muiden vikojen osuus on suuri, koska siihen kuuluvat myös rakenneviat. Erona lyhyisiin keskeytyksiin, salamat ja eläimet aiheuttavat suhteessa huomattavan paljon vähemmän pysyviä vikoja kuin jälleenkytkennällä selvitettyjä tapahtumia.



Kuva 5.7. Pysyvien vikojen aiheuttajat Sähkösäntalla A (vasemmalla) sekä Sähkösäntalla B (oikealla).

6 YMPÄRISTÖTEKIJÄT

6.1 Jakeluverkko Suomen ympäristöolosuhteissa

6.1.1 Metsä

Avojohtojen sijaitseminen metsässä on yleistä historiallisista syistä. Sähköverkkojen yleistyessä 1950-luvulla, avojohdot rakennettiin usein lyhyimmän reitin mukaan. Luotettavuudella ei ollut suurta painoarvoa investointipäätöksissä ja tärkein ominaisuus oli minimoida investointikustannukset materiaalipulan vuoksi [Loh 05]. Maankäyttösopimusten saaminen metsänomistajien kanssa ei myöskään ollut niin vaikeaa kuin nykyään. Edelleen valtaosa jakeluverkoista sijaitsee alkuperäisellä paikallaan, metsässä.

Metsätyypillä on merkittävä vaikutus vika- ja jälleenkytkentätaajuuksiin. Erityisesti puulajilla, iällä ja metsän tiheydellä on merkitystä. Esimerkiksi nuoret koivut ovat herkkiä taipumaan tuulen ja lumimassan voimasta. Tutkimuksen kannalta järkevää olisikin jakaa metsä pienempiin osiin, esimerkiksi riskikertoimien mukaan. Tämän diplomityön aineisto ei kuitenkaan mahdollista tätä. Metsällä tarkoitetaan tässä yhteydessä avojohdon molemmiin puolin olevaa metsäkaistaa, ottamatta kantaa siihen, minkälaisia puita se sisältää.

6.1.2 Tienvarsi

Sähköverkkoja alettiin rakentaa teiden läheisyyteen 1960- ja 1970-luvuilla. Tällöin kuitenkin jätettiin kymmenien metrien metsäpalsta näkösuojaksi tien ja avojohdon välille. Vasta tämän jälkeen yleistyi sähköverkkojen rakentaminen teiden välittömään läheisyyteen.

Teiden varsilla puut ylettyvät kaatumaan avojohdon päälle ainoastaan toiselta puolelta tietä. Tällöin puista aiheutunut vikaantumisriski on teoriassa puolet metsään verrattuna. Mikäli tietyllä alueella on tiedossa yleisimmät tuulten suunnat, kannattaa avojohto sijoittaa tuulen suuntaan tien vastakkaiselle puolelle. Tien varrelle sijoitetun avojohdon pysyvien vikojen kestot lyhenevät, kun huoltoryhmä pääsee nopeammin paikalle ja viat voidaan paikallistaa nopeammin.

6.1.3 Avomaa

Tämän diplomityön yhteydessä avomaalla tarkoitetaan lähinnä peltoa. Avojohtojen reittivalinnassa kannattaa suosia peltoja. Syynä tälle ovat kustannukset sekä luotettavuus. Suoraan voidaan päätellä, että pelloille sijoitettuna avojohdot eivät ole vikaherkkiä myrskyjen sekä lumen aiheuttamille vioille. Avojohtojen sijoittamista pellolle suosii myös kustannussäästöt. Ensinnäkin maanomistajalle maksettavat korvaukset ovat pienemmät, koska pellolla sijaitseva jakeluverkko ei merkittävästi pienennä maanviljelyksen kannattavuutta. Toiseksi, säästöä kertyy myös ylläpito- ja keskeytyskustannuksissa. Metsässä sijaitsevan jakeluverkon ylläpitokustannuksiin kuuluvat muun muassa johtokadun raivauksesta aiheutuneet kustannukset. Pellolle sijoitettuna näiltä vältetään ja ainoaksi kustannukseksi jää satunnainen komponenttien kunnossapitotarkastus.

Avomaalla tarkoitetaan myös hakkuualueita, soita sekä muita vastaavia avonaisia alueita. Tässä diplomityössä on oletettu, että avojohdon sijaitessa yli 50 metrin päässä lähimmistä puista, ei vikoja aiheudu puustosta. Tällä etäisyydellä puut eivät yllä kaatumaan avojointojen päälle sekä tuulen lennättämien oksien osuminen jännitteisiin osiin on harvinaista.

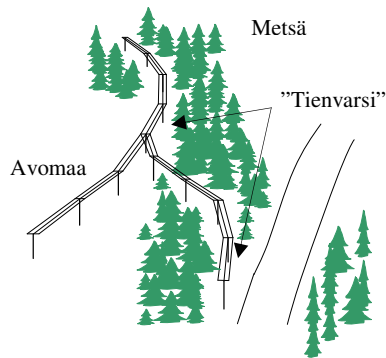
6.2 Jako ympäristötekijöihin

6.2.1 Jaotteluperusteet

Apuna ympäristöolosuhteiden lajittelussa on käytetty Kainuun Sähköverkko Oy:n GPS-paikannettujen pylväiden maastotietoja. Pylvästiedoissa on esitetty maapohja, jolla pylväs sijaitsee. Teiden varsilla sijaitsevat avojohdot on määritelty karttapohjan avulla. Karttapohjan perusteella tehtyjen mittausten perusteella saadut johtopituudet on sovitettu GPS-mittauksia vastaaviksi, niin että ympäristöolosuhteiden suhde säilyy samana.

Lyhyiden keskeytysten tapauksessa ympäristötekijäksi on voitu määritellä tienvarsi, vaikkei avojointo sijaitsekaan tien välittömässä läheisyydessä. Teiden varsia vastaava ympäristöolosuhde syntyy esimerkiksi silloin, kun johto kulkee pellon ja metsän laidalla kuvan 6.1 tapaan. Pysyvien vikojen osalta samaa jaottelua ei ole käytetty, koska tällöin menetetään vikojen nopeasta paikallistamisesta ja korjauksesta saatu hyöty. Tästä johtuen

pysyvien vikojen osalta ympäristöolosuhteeksi on vastaavassa tilanteessa merkitty metsä. Tällä jaottelulla pysyvien vikojen osuus metsässä on ehkä todellista suurempi johtuen metsän suuremmasta osuudesta.



Kuva 6.1. Lyhyiden keskeytysten tapauksessa käytetty jaottelu ympäristöolosuhteissa

6.2.2 Arvioidut ympäristöolosuhteet sähköasemien lähdöillä

Taulukossa 6.1 on esitetty Sähköaseman A syöttämien lähtöjen ympäristöolosuhteet prosenttiosuuksina sekä kilometreinä. Tuloksista havaitaan, että kyseisen sähköaseman alueella avomaan osuus ympäristöistä on suuri, varsinkin lähtöjen 1, 3 ja 4 osalta. Näillä lähdöillä esiintyy paljon maanviljelystä ja näin ollen pelloja.

Taulukko 6.1. Sähköaseman A lähtöjen ympäristöolosuhteet

	Lähtö 1	Lähtö 2	Lähtö 3	Lähtö 4	Lähtö 5
Metsä					
pituus [km]	14.7	21.8	12.2	37	25.6
pituus [100 km]	0.147	0.218	0.122	0.37	0.256
osuus [%]	38.3	70.1	53.0	52.7	71.5
Tienvarsi					
pituus [km]	9.4	5.2	3.1	7.1	3.9
pituus [100 km]	0.094	0.052	0.031	0.071	0.039
osuus [%]	24.5	16.7	13.5	10.1	10.9
Avomaa					
pituus [km]	14.3	4.1	7.8	26.1	6.3
pituus [100 km]	0.143	0.041	0.078	0.261	0.063
osuus [%]	37.2	13.2	33.9	37.2	17.6
Yhteensä					
pituus [km]	38.4	31.1	23	70.2	35.8
pituus [100 km]	0.384	0.311	0.23	0.702	0.358
osuus [%]	100	100	100	100	100

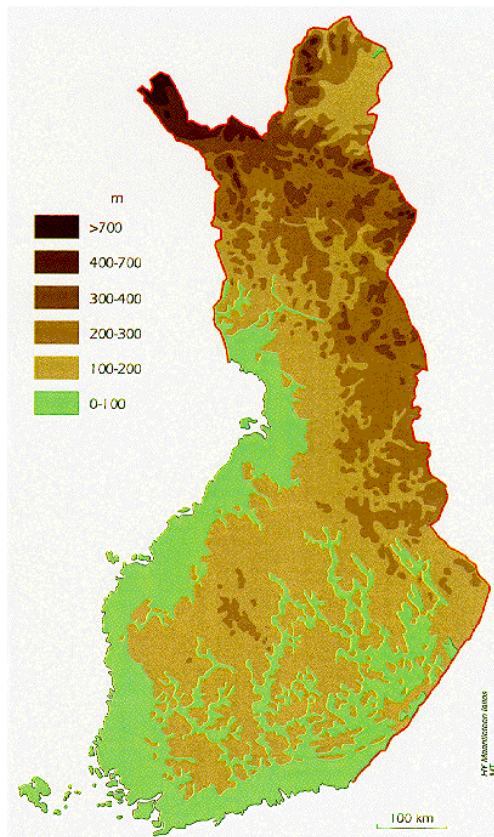
Taulukosta 6.2 nähdään vastaavasti Sähköaseman B lähtöjen ympäristöolosuhteet. Erona Sähköaseman A lähtöihin verrattuna, havaitaan metsäisyyden suuri osuus. Tutkimuksessa olleilla kahdella sähköasemalla ympäristöolosuhteet vaihtelevat huomattavasti, mikä selittää edellisissä kappaleissa saatuja tuloksia.

Taulukko 6.2. Sähköaseman B lähtöjen ympäristöolosuhteet

	Lähtö 1	Lähtö 2	Lähtö 3	Lähtö 4	Lähtö 5
Metsä					
pituus [km]	162.1	64.4	130.2	39.3	154.2
pituus [100 km]	1.621	0.644	1.302	0.393	1.542
osuus [%]	79.1	81.9	72.5	82.4	65.4
Tienvarsi					
pituus [km]	27.9	6.85	38	4.5	67.4
pituus [100 km]	0.279	0.0685	0.38	0.045	0.674
osuus [%]	13.6	8.7	21.2	9.4	28.6
Avomaa					
pituus [km]	14.9	7.4	11.4	3.9	14.2
pituus [100 km]	0.149	0.074	0.114	0.039	0.142
osuus [%]	7.3	9.4	6.3	8.2	6.0
Yhteensä					
pituus [km]	204.9	78.65	179.6	47.7	235.8
pituus [100 km]	2.049	0.7865	1.796	0.477	2.358
osuus [%]	100	100	100	100	100

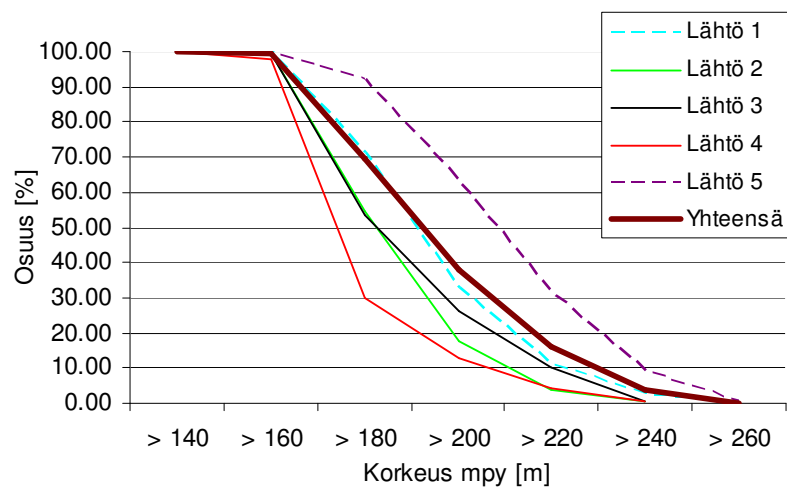
6.3 Korkeus merenpinnasta

Ympäristötekijöiden tarkastelussa on syytä kiinnittää huomiota myös korkeuteen, jolla avojohto sijaitsee. Korkeammilla alueilla tuulen nopeus on yleensä suurempi, koska maanpinnan aiheuttama kitka on pienempi. Kahden sähköaseman lähtöjen korkeudet merenpinnan yläpuolella vaihtelevat huomattavasti toisistaan. Sähköasema A sijaitsee lähellä länsirannikkoa, jossa korkeusvaihtelut ovat hyvin pieniä. Sähköasema B sijaitsee puolestaan Vaara-Suomessa, jossa pinnankorkeudet vaihtelevat enemmän. Kuvassa 6.2 esitetään Suomen pinnankorkeusvaihtelut.



Kuva 6.2. Suomen korkeusvyöhykkeet [Tik 94]

Karttapohjan avulla tehtiin Sähköaseman B lähdöille korkeustarkastelu, jonka perusteella muodostettiin kuvan 6.3 pysyvyyskäyrät. Kuvasta havaitaan, että keskimäärin 60 % lähdöistä sijaitsee alle 200 m mpy. Sähköaseman A lähdöillä korkeus on keskimäärin 100 m mpy. Tarkempaa tarkastelua ei tehty pienten vaihteluiden takia.



Kuva 6.3. Pinnankorkeuden pysyvyyskäyrät Sähköaseman B lähdöillä

7 VIKOJEN RIIPPUVUUS YMPÄRISTÖSTÄ

7.1 Salama

Avojohto luo maan päälle sähköisen varjon, jolta se kerää salamoita maan sijasta. Varjon leveyteen vaikuttavat salamavirran suuruus, uloimpien johdinten välinen etäisyys sekä pylvään korkeus. Salaman iskuetäisyys riippuu salaman purkausvirran huippuarvosta kaavan 7.1 mukaisesti. Tutkijat ovat antaneet kertoimille G ja b lukuisia eri arvoja. Kuvassa 7.1 on esitetty eri mallien antamia arvoja iskuetäisyydelle. Tässä diplomityössä on käytetty Brown-Whitehead -mallia, koska tällöin saavutetaan isoimmat iskuetäisyydet ja ääriarvot turvallisuuden kannalta.

$$s = G i^b \quad (7.1)$$

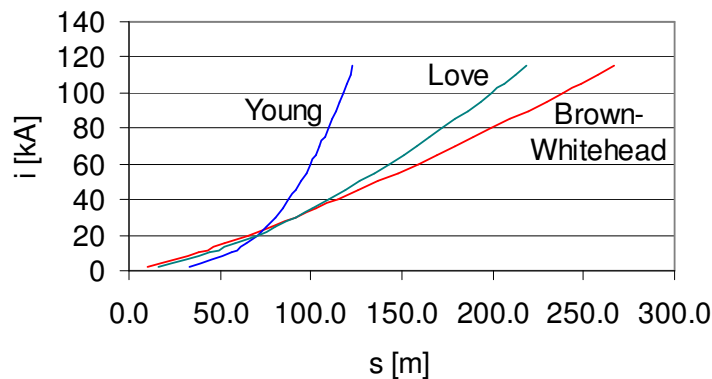
s = salaman iskuetäisyys [m]

i = salamavirran huippuarvo [kA]

Brown-Whitehead: $G = 6.0$ ja $b = 0.80$

Young: $G = 27.0$ ja $b = 0.32$

Love: $G = 10$ ja $b = 0.65$



Kuva 7.1. Salaman iskuetäisyyden (s) määräytyminen salamavirran amplitudin perusteella. Youngin mallia on yksinkertaistettu [Aro 03]. [Cig 91]

Seuraavassa on käsitelty teoreettisesti todennäköisyyttä, jolla salama iskee suoraan avojohtoon eri ympäristöolosuhteissa. Lähteessä [Hän 82] on tarkasteltu salaman iskemistä siirtoverkkoon. Tällöin on todettu, että suurjännitteinen avojohto kerää salamoita maanpintaa tehokkaammin. Tässä tarkastelussa tätä ei huomioida jakeluverkon pienten jännitteiden takia.

Seuraavat oletukset on tehty:

- avojohto ei kerää salamoita sen paremmin kuin puut tai maa
- avojohto on oletettu yhdeksi pisteeksi (= yksivaiheinen avojohto)
- puiden korkeus on vakio

7.1.1 Suorat iskut avomaalla

Kuvassa 7.2a on esitetty salaman mahdollinen osuma avojohtoon avomaan tapauksessa. Paksumpi viiva kuvaa pylvästä (h). Avojohto kerää salamoita ympyrän kaarelta. Rajatapauksena on piste, jossa salaman iskuetäisyys (s) avojohtoon on sama kuin maahan. Trigonometrian perusteella voidaan ratkaista leveys (x), jolta salama iskee avojohtoon. Edellä laskettiin yksinkertaisuuden vuoksi sähköinen varjo vain avojohdon toiselle puolelle. Symmetrian perusteella koko johdon muodostama sähköinen varjo saadaan kertomalla kaavan 7.2 tulos kahdella.

$$x = \sqrt{s^2 - (s - h)^2} \quad (7.2)$$

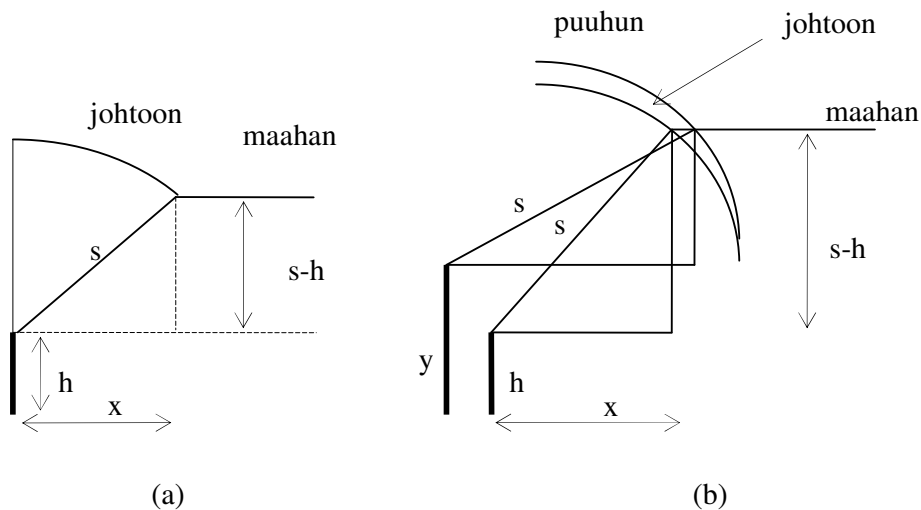
s = salaman iskuetäisyys [m]

h = pylvään korkeus [m] (= 10 m)

x = leveys, jolta salama osuu avojohtoon [m]

y = puun korkeus [m]

j = johtokadun leveys [m] (= 10 m)



Kuva 7.2. Salaman osuminen avojohtoon avomaalla (a) sekä tien varressa (b).

Kaavasta 7.2 havaitaan, että avomaalla sijaitsevaan avojohtoon osuvien salamoiden määrä riippuu pylväiden korkeudesta sekä salaman iskuetäisyydestä. Salaman iskuetäisyyden myötä avojohdon synnyttämä sähköinen varjo on aidosti kasvava funktio. Mitä suurempi salamavirta, sitä isommalta alueelta avojohto kerää salamoita. Taulukossa 7.1 on esitetty varjon leveyden riippuvuutta salamavirran huippuarvosta. Iskuetäisyys on laskettu kaavan 7.1 avulla käyttäen Brown-Whitehead –mallia.

Taulukko 7.1. Avojohtoon muodostama varjo avomaalla eri salamavirran arvoilla

Salamavirta [kA]	Iskuetäisyys [m]	Varjon leveys [m]	Salamavirta [kA]	Iskuetäisyys [m]	Varjon leveys [m]
5	21.74	36.60	55	148.06	106.98
10	37.86	51.27	60	158.73	110.90
15	52.36	61.56	65	169.23	114.62
20	65.91	69.81	70	179.57	118.18
25	78.80	76.84	75	189.76	121.58
30	91.17	83.03	80	199.81	124.84
35	103.13	88.60	85	209.74	127.98
40	114.76	93.71	90	219.56	131.01
45	126.10	98.43	95	229.26	133.94
50	137.19	102.84	100	238.86	136.78

7.1.2 Suorat iskut tien varressa

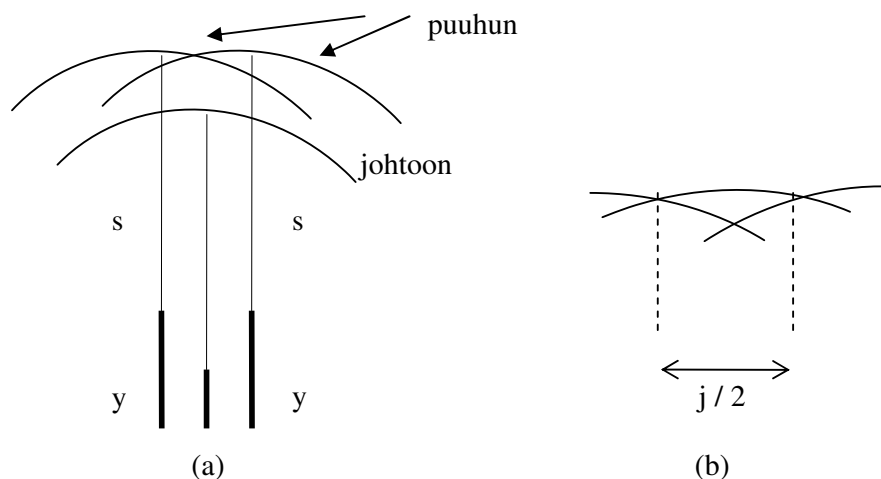
Kuvassa 7.2b on esitetty vastaava tilanne tien varressa sijaitsevalle avojohdolle. On oletettu, että tien toisella puolella on täysin avomaata vastaava ympäristö. Näin saavutetaan eniten turvallisuutta tuottava arvio suorille salamaniskuille. Nyt tilanteessa on mukana puu (y), jonka etäisyys pylvästä on puolet johtokadusta (j). Puu synnyttää samanlaisen varjon kuin avojohto, jolta se kerää salamat itseensä. Näin syntyy kaksi rajatapauستا; puun ja maan sekä avojohdon ja maan välille. Kuvassa 7.3 on esitetty tilanne tarkemmin. Mikäli puun ja pylvään kaari leikkaavat toisensa vasta rajapisteen jälkeen, ei avojohtoon voi osua salamoita.

Taulukko 7.2. Avojohtodon muodostama sähköinen varjo tien varressa. Harmaalla väritetty yhdistelmä, jolloin varjo on positiivinen ja salaman on mahdollista osua suoraan avojohtoon.

Salamavirta [kA]	Iskuetäisyys [m]	Puun korkeus [m]			
		10	15	20	25
5	21.74	20.80	5.63	2.01	1.58
10	37.86	28.13	1.48	-5.35	-6.99
15	52.36	33.28	-3.66	-13.29	-15.83
20	65.91	37.40	-9.14	-21.34	-24.68
25	78.80	40.92	-14.74	-29.38	-33.46
30	91.17	44.01	-20.40	-37.38	-42.15
35	103.13	46.80	-26.08	-45.31	-50.75
40	114.76	49.35	-31.76	-53.17	-59.26
45	126.10	51.71	-37.42	-60.96	-67.68
50	137.19	53.92	-43.06	-68.69	-76.02
55	148.06	55.99	-48.67	-76.35	-84.27
60	158.73	57.95	-54.26	-83.94	-92.45
65	169.23	59.81	-59.83	-91.47	-100.56
70	179.57	61.59	-65.36	-98.95	-108.60
75	189.76	63.29	-70.87	-106.36	-116.58
80	199.81	64.92	-76.35	-113.73	-124.49
85	209.74	66.49	-81.80	-121.04	-132.35
90	219.56	68.01	-87.22	-128.31	-140.15
95	229.26	69.47	-92.62	-135.52	-147.89
100	238.86	70.89	-97.99	-142.70	-155.59

7.1.3 Suorat iskut metsässä

Tien varressa todettiin avojohtodon olevan hyvässä turvassa suorilta salamaniskuilta, mikäli viereisen puun korkeus oli suurempi kuin pylvään korkeus. Metsässä tilanne on vielä parempi (kuva 7.4a). Reunapuiden ollessa yhtä korkeita kuin pylvää, muodostuu avojohtolle pieni varjo, johon salama voi osua. Tämän varjon leveys on puolet johtokadusta (kuva 7.4b) eli noin 5 metriä. Todennäköisyys suoralle salamaniskulle on kuitenkin hyvin pieni, sillä neliökilometrin alueella suoraan kulkevalle johdolle osuu 0.5 % salamoista. Puut ovat yleisesti korkeampia kuin pylvää. Metsässä sijaitsevan avojohtodon voidaan olettaa olevan täysin turvassa suorilta salamaniskuilta.



Kuva 7.4. Salamaniskun osuminen avojohtoon metsässä (a). Avojohtoon muodostama varjo, kun pylväs ja puut ovat yhtä korkeita (b).

7.1.4 Epäsuora salamanisku ja indusoitunut ylijännite

Vaikka suora salamanisku on vaarallisempi verkon komponenteille, on se hyvin harvinainen, kuten edellä huomattiin. Salama iskee useammin johdon läheisyyteen. Tällöin muodostuu johtimiin ylijännite sähkömagneettisen induktion myötä. Ylijännite indusoituu ainoastaan suljettuun virtapiiriin, joten esimerkiksi metsän puut eivät sen sisältämää energiaa vähennä. Indusoituneiden ylijännitteiden määrä ja suuruus eivät näin riipu ympäristöolosuhteista. Metsäisissä olosuhteissa salama pääsee kuitenkin iskemään lähemmäksi johtoa verrattuna avomaahan. Avomaalla avojohto keräisi kyseiset salamat puoleensa suoraan. Jännitteen suuruutta voidaan karkeasti arvioida kaavan 7.4 perusteella [Aro 03].

$$u_{ind} = k i Z_0 \frac{h}{d} \quad (7.4)$$

k = kerroin salamavirran etenemisnopeudelle purkauskanavassa (1.2...1.3)

i = salamavirran huippuarvo [A]

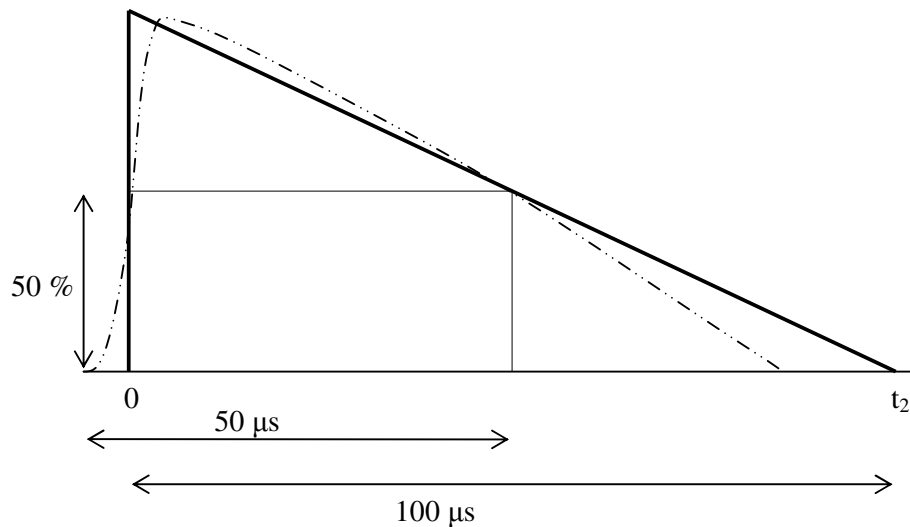
Z_0 = impedanssin dimension omaava vakio ($\approx 30 \Omega$)

h = johdon korkeus [m]

d = salaman iskupaikan etäisyys johdosta [m]

7.1.5 Salaman energia

Salaman aiheuttamat häiriöt johtuvat jakeluverkkoon syntyneestä salamaimpulssista. Sen sisältämä energia määrää verkon komponenteille aiheutuneen rasituksen. Salamaimpulssin sisältämä energia on yksilöllinen. Se riippuu salamavirran suuruudesta, pulssin muodosta sekä kestosta. Yleisesti salaman aiheuttamaa syöksyaaltoa mallinnetaan 1.2/50 μs –testausjännitteellä (kuva 7.5). Jännite nousee maksimiarvoonsa 1.2 μs aikana ja vastaavasti 50 μs jälkeen jännite on laskenut 50 % huippuarvosta. Diplomityössä kyseistä syöksyaaltoa on approksimoitu suorakulmaisella kolmiolla, jonka avulla on arvioitu salamaimpulssin sisältämää energiaa. Kolmio saavuttaa huippuarvonsa äärettömän nopeasti hetkellä $t=0$. Vastaavasti hetkellä t_2 pulssin jännite on laskenut nollaan. Pulssin kestoksi on arvioitu 100 μs .



Kuva 7.5. Syöksyaallon testausjännite (1.2/50 μs) katkoviivalla sekä yksinkertaistettu pulssi yhtenäisellä viivalla

Kyseisen kolmioimpulssin energia määräytyy kaavan 7.5 mukaisesti. Kaava on johdettu liitteessä 3.

$$W = \frac{u^2}{Z} \cdot \left(\frac{t_2}{3} \right) \quad (7.5)$$

u = jännitteen huippuarvo

Z = aaltoimpedanssi (diplomityössä oletettu olevan 400 Ω)

t_2 = impulssin kesto (diplomityössä oletettu olevan 100 μs)

7.1.6 Ylijännitesuojauksen vaikutus salaman aiheuttamiin vikamääriin

Puoliventtiilisuojiin käyttöä ylijännitesuojauksessa puoltaa niiden kyky purkaa ylijännitteitä verkosta ilman jälleenkytkentöjä. Kuitenkin niiden energian siirtokyky on rajallinen. Seuraavaksi verrataan puoliventtiilisuojan energian siirtokykyä salaman aiheuttaman impulssin energiaan. Mikäli energian siirtokyky on suurempi, purkaa suoja salaman energian maahan ilman katkaisijatoimintoja. Vastaavasti, jos salamaimpulssin energia on suurempi, tarvitaan verkossa jälleenkytkentöjä. Tällöin on myös mahdollista, että verkon komponenteissa tapahtuu rikkoutumisia.

KAI:n jakeluverkko on pääosin rakennettu 1960- ja 1970-luvuilla. Sen jälkeen verkkoa on saneerattu tarpeen vaatiessa. Verkosta löytyykin eri toimintakykyisiä, ikäisiä sekä valmistajien tekemiä ylijännitesuojia. Puoliventtiilisuojan tapauksessa on tarkasteltu HDA-15NA -venttiilisuoja, joka on sarjassa 80 mm kipinävälin kanssa. Laitevalmistajan tietojen perusteella (liite 4) kyseisen puoliventtiilisuojan energian siirtokyky on 4.5 kJ/kV U_c ($U_c=15$ kV) eli suoja pystyy purkamaan 67.5 kJ energian. Laitevalmistajan mukaan puoliventtiilisuoja siirtyy johtavaan tilaan, kun 1.2/50 μ s -impulssijännite ylittää arvon 184 kV.

Aloitetaan tarkastelu salaman aiheuttamista indusoituneista ylijännitteistä. Aiemmin todettiin ettei ympäristötekijöillä ole teoriassa vaikutusta niiden esiintymiseen. Kuvitellaan tilanne, jossa suurivirtainen salama ($i = 100$ kA) lyö lähelle ($d = 50$ m) johtoa. Tällöin kaavan 7.4 mukaisesti verkkoon indusoituu 780 kV suuruinen jännite. Energia salamaimpulssissa on kaavan 7.5 mukaan laskettuna 51 kJ eli huomattavasti pienempi kuin puoliventtiilisuojan energian siirtokyky.

$$u_{ind} = k i Z_0 \frac{h}{d} = 1.3 \cdot 100 \text{ kA} \cdot 30 \Omega \cdot \frac{10 \text{ m}}{50 \text{ m}} = 780 \text{ kV} \quad (7.6)$$

$$W = \frac{u^2}{Z} \left(\frac{t_2}{3} \right) = \frac{(780 \text{ kV})^2}{400 \Omega} \cdot \frac{100 \mu\text{s}}{3} = 50700 \text{ J} \approx 51 \text{ kJ} \quad (7.7)$$

Tarkasteluissa käytettiin suurta virran arvoa, jonka esiintymistodennäköisyys kuvan 5.1 mukaan jää vain muutama prosenttiin. Lisäksi iskupaikka oletettiin hyvin lähelle

avojohtoa. Tilanteen harvinaisuuden ja tulosten perusteella voidaan sanoa, että puoliventtiilisuojin toteutetussa verkossa indusoituneet ylijännitteet eivät aiheuta katkaisijatoimintoja, tai ainakin ne ovat hyvin harvinaisia. Lisäksi indusoituneiden ylijännitteiden aaltomuodon rinta on loiva (luokkaa 10 μ s) [Aro 03]. Mallissa käytetty suorakulmainen kolmio antaa näin huomattavasti suurempia energioita. Ylijännitesuoja muodostaa johdolla epäjatkuvuuskohdan. Kulkuaalto, ja sen myötä energiaa, heijastuu takaisin tulosuuntaan. Mahdollisesti osa kulkuaallosta jatkaa myös ylijännitesuojan ohi. Teoreettisessa tarkastelussa oletettiin kaiken energian siirtyvän ylijännitesuojaan ilman heijastumisia. Tältäkin osin malli antaa turvallisempia tuloksia.

Suoran iskun tapauksessa tilanteen tarkastelu on yksinkertaisempi, koska ylijännitteen suuruuteen vaikuttaa ainoastaan salamavirran amplitudi. Kaavat 5.1 ja 7.5 yhdistämällä saadaan epäyhtälö raja-arvolle, jolla puoliventtiilisuojan energian siirtokyky (= 67.5 kJ) ylitetään.

$$W = \frac{u^2}{Z} \cdot \frac{t_2}{3} = \frac{\left(\frac{1}{2}iZ\right)^2}{Z} \cdot \frac{t_2}{3} = \frac{i^2 Z}{12} \cdot t_2 = \frac{i^2 \cdot 400 \Omega}{12} \cdot 100 \mu s \geq 67.5 \text{ kJ} \quad (7.8)$$

$$i \geq \sqrt{\frac{67.5 \text{ kJ} \cdot 12}{400 \Omega \cdot 100 \mu s}} = 4500 \text{ A} = 4.5 \text{ kA} \quad (7.9)$$

Tarkastelun mukaan yli 4.5 kA salamavirta aiheuttaa suorassa iskussa puoliventtiilisuojan energian siirtokyvyn ylittymisen ja näin ollen jälleenkytkennän. Kuvasta 5.1 havaitaan, että 97 % salamaniskuista tämä arvo ylittyy. Suora salamanisku avojohtoon aiheuttaa siis käytännössä aina lyhyen keskeytyksen.

Pelkillä kipinäväleillä toteutetussa ylijännitesuojassa ei ole energian siirto-ominaisuutta. Kun verkon ylijännite ylittää kipinävälin ylilyöntitason, syntyy kipinävälin sarvien yli valokaari, joka vastaa maasulkua. Taulukossa 7.3 on esitetty kipinävälien syttymisarvoja [Abb 00].

Taulukko 7.3. Suojakipinävälien ohjearvoja. [Abb 00]

Suoja	1 % syttymistaso	99 % suojaustaso		
	50 Hz, sade (r.m.s) [kV]	1.2 / 50 μ s [kV]	1000 kV / μ s [kV]	2000 kV / μ s [kV]
Yksivälisuoja 100 mm	40	120	266	325
Kaksivälisuoja 80 mm	42	120	229	245
Yksivälisuoja 80 mm	32	99	215	235
Kaksivälisuoja 60 mm	35	103	175	190

On huomioitava, että salamasyöksyjännitteellä mitattuihin arvoihin vaikuttavat kipinävälin rakenne ja geometria sekä vallitsevat sääolosuhteet [Abb 00, Aro 03]. Kipinävälien syttymisjännitteet 99 % varmuudella ovat noin 100 kV luokkaa. On selvää, että suoran salamaniskun tapauksessa tämä jännite ylitetään ja verkossa tapahtuu keskeytys. Indusoituneet ylijännitteet eivät välttämättä nouse kyseisen arvon yläpuolelle. Taulukkoon 7.4 on laskettu jakeluverkkoon indusoituneita ylijännitteitä kaavan 7.4 perusteella eri salamavirran amplitudeilla ja iskuetäisyyksillä.

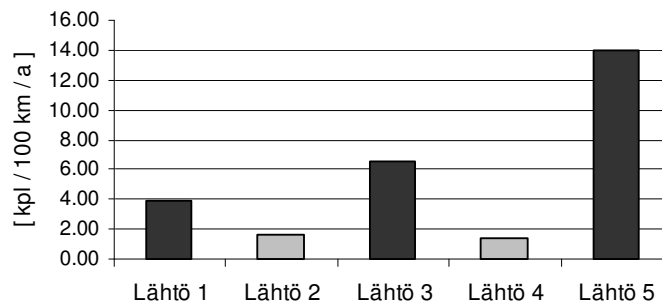
Taulukko 7.4. Jakeluverkkoon indusoituneita ylijännitteitä. Harmaalla väritetty yhdistelmä, jolla mahdollisesti kipinävälin syttymisjännite ylittyy.

Salamavirran amplitudi [kA]	Salamen iskuetäisyys johdosta [m]								
	50	100	150	200	250	300	350	400	450
5	39.00	19.50	13.00	9.75	7.80	6.50	5.57	4.88	4.33
10	78.00	39.00	26.00	19.50	15.60	13.00	11.14	9.75	8.67
15	117.00	58.50	39.00	29.25	23.40	19.50	16.71	14.63	13.00
20	156.00	78.00	52.00	39.00	31.20	26.00	22.29	19.50	17.33
25	195.00	97.50	65.00	48.75	39.00	32.50	27.86	24.38	21.67
30	234.00	117.00	78.00	58.50	46.80	39.00	33.43	29.25	26.00
35	273.00	136.50	91.00	68.25	54.60	45.50	39.00	34.13	30.33
40	312.00	156.00	104.00	78.00	62.40	52.00	44.57	39.00	34.67
45	351.00	175.50	117.00	87.75	70.20	58.50	50.14	43.88	39.00
50	390.00	195.00	130.00	97.50	78.00	65.00	55.71	48.75	43.33
55	429.00	214.50	143.00	107.25	85.80	71.50	61.29	53.63	47.67
60	468.00	234.00	156.00	117.00	93.60	78.00	66.86	58.50	52.00
65	507.00	253.50	169.00	126.75	101.40	84.50	72.43	63.38	56.33
70	546.00	273.00	182.00	136.50	109.20	91.00	78.00	68.25	60.67
75	585.00	292.50	195.00	146.25	117.00	97.50	83.57	73.13	65.00
80	624.00	312.00	208.00	156.00	124.80	104.00	89.14	78.00	69.33
85	663.00	331.50	221.00	165.75	132.60	110.50	94.71	82.88	73.67
90	702.00	351.00	234.00	175.50	140.40	117.00	100.29	87.75	78.00
95	741.00	370.50	247.00	185.25	148.20	123.50	105.86	92.63	82.33
100	780.00	390.00	260.00	195.00	156.00	130.00	111.43	97.50	86.67

Yhteenvedona ylijännitesuojien toiminnasta todetaan, että puoliventtiilisuojat selviävät teoriassa indusoituneista ylijännitteistä ilman asiakkaille aiheutuvaa keskeytystä. Puoliventtiilisuojat teoriassa selviävät myös suorista salamaniskuista, mikäli salamavirran amplitudi jää alle 4.5 kA. Kipinäväleillä toteutettu ylijännitesuojaus tarvitsee sen sijaan jälleenkytkentöjä salamaimpulssin amplitudin kasvaessa yli 100 kV. Tämä tapahtuu varmasti suorien salamaniskujen sekä mahdollisesti lähelle (~ satoja metrejä) avojohtoa osuneiden salamoiden tapauksessa.

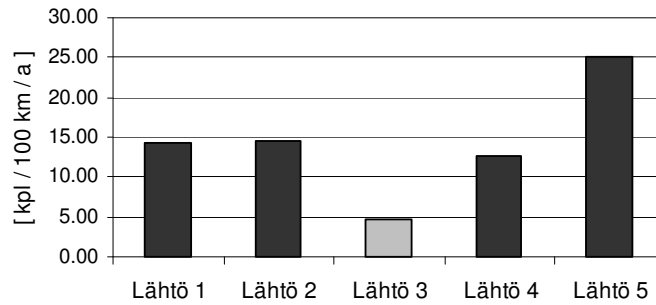
7.1.7 Salamoiden aiheuttamat lyhyet keskeytykset

Kuvassa 7.6 on esitetty Sähköaseman A lähdöillä tapahtuneet lyhyet keskeytykset, joiden aiheuttajaksi on arvioitu salama. Lähtöjen 2 ja 4 ylijännitesuojina käytetään puoliventtiilisuoja. Kyseisillä lähdöillä salamoista aiheutuneita jälleenkytkentöjä on esiintynyt huomattavasti vähemmän kipinävälillisiin lähtöihin verrattuna. Edellä todettiin puoliventtiilisuojan selviävän teoriassa epäsuorista salamaniskuista ilman jälleenkytkentöjä. Lähtöjen 2 ja 4 jälleenkytkennät voisivat olla aiheutuneet suorista salamaniskuista.



Kuva 7.6. Sähköaseman A lähdöillä tapahtuneet salaman aiheuttamat lyhyet keskeytykset. Vaaleammalla puoliventtiilisuojatut lähdöt.

Sähköaseman B vastaavat viat on esitetty kuvassa 7.7. Puoliventtiilisuojoilla varustetulla lähdöllä jälleenkytkentöjä näyttäisi jälleen olevan vähemmän salamoiden aiheuttamissa vioissa. Lähdöllä 1 ylijännitesuojaus vaihdettiin kipinäväleistä puoliventtiilisuojiin kesken tarkastelujakson, joten kyseistä lähtöä ei ole otettu huomioon tarkasteluissa.



Kuva 7.7. Sähköaseman B lähdöillä tapahtuneet salaman aiheuttamat lyhyet keskeytykset. Vaaleammalla puoliventtiilisuojaattu lähtö.

Indusoituneet ylijännitteet ja kipinävälin syttymisjännitteen teoreettiset ylittymiset on esitetty taulukossa 7.4. Kun ne yhdistetään kuvan 5.1 tietoihin sekä keskimääräisiin salamaniskutiheyksiin (liite 1), saadaan odotusarvo salamoiden aiheuttamille jälleenkytkennöille kipinävälein suojatuissa lähdöissä. Tämä on tehty liitteessä 5 molemmille sähköasemille. Sähköaseman A alueella salamaniskutiheys oli keskimäärin kahden vuoden tarkastelujaksolla 11 salamaa/100 km²/a. Vastaava luku Sähköaseman B alueella oli 17 salamaa/100 km²/a.

Laskemalla yhteen liitteessä 5 harmaalla esitetyt odotusarvot kipinävälien syttymiseen johtavista salamaniskuista, saadaan arvio indusoituneiden ylijännitteiden aiheuttamista jälleenkytkennöistä kipinävälein suojatuilla lähdöillä. Sähköaseman A lähdöillä teoriassa tapahtuu 6.8 jälleenkytkentää/100 km/a ja Sähköaseman B lähdöillä vastaavasti 10.5 jälleenkytkentää/100 km/a. Verrattaessa saatuja lukuja kuvien 7.6 ja 7.7 tummiin pylväisiin, havaitaan teorian vastaavan hyvin aineistosta saatuja tuloksia.

Kirjallisuudesta löytyy seuraava matemaattinen malli suorille salamaniskuille avomaan tapauksessa. [Cir 97]

$$N_d = K_0 N_g (b + 10.5 \cdot h^{0.75}) \cdot \frac{1}{10} \quad (7.10)$$

N_g = salamaniskutiheys [salamoita / km² / a]

K_0 = orograafinen vakio (= 1.8)

b = ulointen vaihejohdinten välinen etäisyys [m] (= 2 m)

h = pylvään korkeus [m] (= 10 m)

Sähköaseman A alueella salamaniskutiheys oli keskimäärin kahden vuoden tarkastelujaksolla 11 salamaa/100 km²/a (= 0.11 salamaa/km²/a). Sähköaseman B alueella vastaava luku 0.17 salamaa/km²/a. Sijoitetaan nämä arvot kaavaan 7.10, jolloin saadaan arvio suorien iskujen lukumäärästä avojohdolle.

$$N_{d,A} = 1.8 \cdot 0.11 \cdot (2 + 10.5 \cdot 10^{0.75}) \frac{1}{10} = 1.2...kpl / 100 km / a \quad (7.11)$$

$$N_{d,B} = 1.8 \cdot 0.17 \cdot (2 + 10.5 \cdot 10^{0.75}) \frac{1}{10} = 1.8...kpl / 100 km / a \quad (7.12)$$

Suorien salamaniskujen lukumäärää lähdölle voidaan arvioida myös hyvin yksinkertaisella tavalla. Kuvan 5.1 perusteella havaitaan, että 50 % todennäköisyydellä salamavirran amplitudi on 35 kA. Vastaavasti taulukon 7.1 perusteella avojohdon sähköiseksi varjoksi saadaan 90 m kyseisellä salamavirran arvolla. Lisäksi oletetaan salamaniskutiheyden olevan vakio koko lähdön alueella sekä salamoiden jakautuvan tasaisesti alueelle. Tällöin voidaan suorien iskujen määrää [kpl/100 km/a] arvioida yksinkertaisesti seuraavalla kaavalla geometriaan perustuen.

$$N_d = \frac{N_g \cdot x}{1000} \quad (7.13)$$

N_g = salamaniskutiheys [salamoita/100 km²/a]

x = avojohdon muodostama sähköinen varjo [m] (= 90 m)

Seuraavassa on laskettu arvio suorille salamaniskuille diplomityössä esitetyn yksinkertaisen mallin mukaisesti. Salamaniskutiheyksinä on käytetty aiemmin esitettyjä arvoja ja keskimääräisenä sähköisenä varjona 90 m.

$$N_{d,A} = \frac{N_g \cdot x}{1000} = \frac{11 \cdot 90}{1000} = 0.99 kpl / 100 km / a \quad (7.14)$$

$$N_{d,B} = \frac{N_g \cdot x}{1000} = \frac{17 \cdot 90}{1000} = 1.53 kpl / 100 km / a \quad (7.15)$$

Verrattaessa saatuja arvoja kaavoissa 7.11 ja 7.12 laskettuihin arvoihin, havaitaan niiden yhteneväisyys. Itse asiassa lähteen [Cir 97] malli ottaa tarkemmin huomioon avojohdon luoman sähköisen varjon. Kuitenkin tässä diplomityössä esitetty yksinkertaisempi malli on hyvä nyrkkisääntö laskettaessa avojohdolle suoraan osuvia salamoita.

Sähköasemalla A avomaan osuus on huomattavan suuri (~ 30 %) avojohdtoa ympäröivästä olosuhteista. Sähköaseman A puoliventtiilisuojuatuilla lähdoillä salamoiden aiheuttamat jälleenkytkentäaajuudet aineiston (kuva 7.6) mukaan ovat noin 1.5 – 2 kpl/100 km/a. Kaavoissa 7.11 ja 7.14 esitetyt teoreettiset mallit antavat vastaavia arvoja.

Sähköaseman B lähdoillä avomaa on ympäristönä harvinainen. Kuitenkin salamoiden aiheuttama jälleenkytkentäaajuus puoliventtiilisuojuatulla lähdoillä on 5 kpl/100 km/a (kuva 7.7). Alueella salamaniskutiheys on suurempi, mutta sekään ei riitä yksin selittämään eroa.

Seuraavat syyt selittävät eroja:

- vian aiheuttajaksi on virheellisesti luokiteltu salama, vaikka todellisuudessa sen on aiheuttanut jokin muu (esim. ukkosmyrskyjen aikana voimakas tuuli)
- metsässä ja tien varressa salama voi osua avojohdtoon epäsuorasti esim. puun kautta

7.1.8 Salamoiden aiheuttamat pysyvät viat

Taulukossa 7.5 on verrattu puoliventtiilisuojuatuilla lähdoillä tapahtuneiden suorien salamaniskujen teoreettista lukumäärää. Laskennat perustuvat kaavaan 7.13. Avomaan tapauksessa on käytetty sähköisenä varjona 90 m sekä tien varressa että metsässä 10 m. Metsän ja tien varren osuutena on käytetty siis johtokadun leveyttä. On tehty oletus, että vaikka puu avojohdon vierellä suojaisikin sitä suoralta iskulta, on mahdollista, että salama hyppää puusta johtimiin. Tämä vastaa käytännössä lähes suoraa salamaniskua johtimeen. Saadut salamaniskutaajuudet on kerrottu vastaavien ympäristöjen johtopituuksilla, jotka on kerätty taulukoista 6.1 ja 6.2. Tarkastelu tehdään vain puoliventtiilisuojuatuille lähdoille, koska tällöin tulosta voidaan verrata aineistoihin, jotka on esitetty kuvissa 7.6 ja 7.7.

Taulukko 7.5. Suorat salamaniskut puoliventtiilisuojilla suojattuihin lähtöihin

	Keskimääräinen salamaniskutiheys [kpl/100 km ² /a]	Suorat iskut teoriassa [kpl / a]	Pysyvät viat [kpl]
Sähköasema A			
Lähtö 2	11	0.07	0
Lähtö 4	13.8	0.39	1
Sähköasema B			
Lähtö 3	16.3	0.44	1

Taulukon 7.5 perusteella diplomityössä esitetty teoreettinen malli suorille salamaniskuille avojohtoon näyttäisi tukevan aineistosta saatuja tietoja. Kuten lukuarvoista havaitaan, suora salamanisku avojohtoihin on hyvin harvinainen. Keskimääräinen salamaniskutiheys ei tarkastelujaksolla ollut kovin suuri. Sähköaseman B alueelta löytyi osia, joissa salamaniskutiheys oli peräti 50 kpl/100 km²/a. Vastaavasti löytyi myös alueita, joilla vastaava luku jäi alle 10 kpl/100 km²/a. Tarkastelujakson ollessa vain kaksi vuotta, ei voitu selvittää kerääkö jokin tietty alue salamoita enemmän puoleensa.

Taulukossa 7.5 on myös esitetty pysyvien vikojen lukumäärät samoilla lähdöillä. Niiden määrä on myös hyvin alhainen, josta voidaan päätellä, että suora isku aiheuttaa todennäköisimmin pysyvän vian.

Erityisesti muuntajat ovat herkkiä salamoille. Kipinävälein suojatuissa muuntajissa myös itse kipinäväli aiheuttaa ongelmia, sillä sen toiminta aiheuttaa jännitteen romahdusmaisen alenemisen. Tämä voi olla vaaraksi muuntajan käämityksille. Salamoiden aiheuttamat viat eivät välttämättä paljastu välittömästi. On havaittu, että ukkoskesän jälkeen syksyllä ilmenee yllättäviä muuntajavikoja. Arvion mukaan salamat ovat vaurioittaneet kesällä alustavasti muuntajia ja kuormituksen kasvaessa syksyllä ne hajoavat lopullisesti [Rei 07]. Kappaleessa 5 todettiin salamoiden aiheuttavat molemmilla sähköasemilla noin 6 % kaikista pysyvistä vioista. Todellisuudessa tämä luku voi olla jopa suurempi.

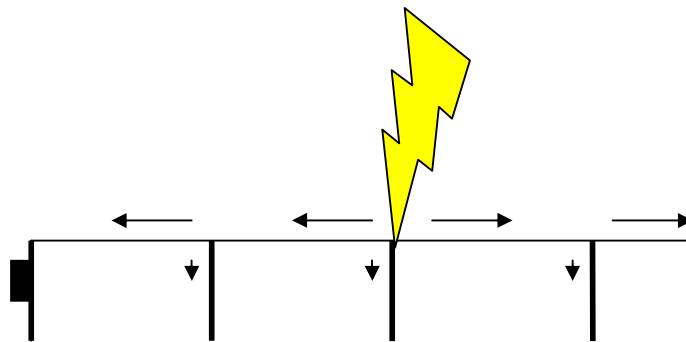
Tarkastellaan seuraavaksi pysyviä vikoja, joiden aiheuttajaksi on epäilty salamaa. Salamoiden aiheuttamia vikoja esiintyi vähän, joten lähtökohtaista tarkastelua ei tehty. Sähköasemalla A tapahtui tarkastelujaksolla vain yksi pysyvä vika avomaalla. Pienen otannan vuoksi tarkastelu on tehty ainoastaan Sähköaseman B lähdöille. Taulukossa 7.6 on esitetty salamoiden aiheuttamat viat eri ympäristöissä sekä lasketut vikataajuudet. Kun

verrataan vikataajuutta sekä aiemmin laskettua suorien salamaniskujen teoreettista määrää, havaitaan niiden yhteneväisyys.

Taulukko 7.6. Salamoiden aiheuttamat pysyvät viat eri ympäristöissä

	vikoja [kpl]	pituus [km]	vikataajuus [kpl / 100km / a]
Avomaa	3	51.80	2.90
Metsä	2	550.20	0.18
Tienvarsi	1	144.65	0.35

Kuvassa 7.8 esitetään salamaimpulssin etenemistä avojohdolla. Pylväiden kohdalla voi pieni määrä energiaa siirtyä maahan, mutta todennäköisemmin impulssi jatkaa johdinta pitkin. Salama pääsee maahan vasta ensimmäisessä mahdollisessa purkauspaikassa, joka on yleensä muuntaja. Tämä selittää osittain metsässä tapahtuneet viat, jolloin avomaalle iskeneen salaman impulssi on päässyt maihin vasta metsässä.



Kuva 7.8. Salaman energian siirtyminen avojohdajärjestelmässä

Aineiston suppeudesta huolimatta, havaittiin salaman rikkoneen suhteessa paljon muuntajia johdon päätepisteissä. Tällöin koko salamaimpulssin energia pääsee purkautumaan vain yhdestä verkon osasta. Maaseutualueella voi olla pitkiäkin avojohdinosuuksia ilman muuntajia tai muita energian purkauspaikkoja. Salamaniskupaikan lähinnä olevat muuntajat joutuvat purkamaan koko salaman energian.

Maadoituksella on suuri vaikutus vikojen vähentämiseen. Sähköaseman A alueella maadoittaminen on yleensä helpompaa paremman maaperän ansiosta. Sähköaseman B alueella maaperä ei ole suosiollista maadoitukselle ja maadoitusresistanssi nousee usein suureksi. Salamaimpulssin aikana muuntaja joutuu suuremman jänniterasituksen kohteeksi.

7.1.9 Korkeuden vaikutus salamoiden aiheuttamiin vikoihin

Salamoiden aiheuttamia pysyviä vikoja ei aineistoon sisältynyt tarpeeksi paljon, jotta tarkkaa korrelaatiota salamoiden aiheuttamien vikojen ja korkeuden olisi saatu. Oletettavaa olisi, että etenkin korkeilla ja avonaisilla alueilla, avojohto on suuremmassa vaarassa.

7.2 Tuuli

7.2.1 Tuulen aiheuttamat pysyvät viat

Sähköaseman A lähdöillä tuulen aiheuttamien pysyvien vikojen osuus (29 %) oli huomattavasti suurempi kuin Sähköaseman B lähdöillä (18 %) (kuva 5.7). Sähköaseman A lähdöillä aineistossa on vain muutamia vikoja, joten erityisiä johtopäätöksiä ei kannata tehdä. Tuulen aiheuttamat pysyvät viat esiintyvät enimmäkseen myrskyjen yhteydessä.

Taulukossa 7.7 on esitetty sähköasemien lähdöillä tuulen aiheuttamat pysyvät viat. Sähköaseman A osalta on poistettu lähdöt, joilla tuuli ei ole aiheuttanut yhtään pysyvää vikaa. Sähköaseman B tapauksessa havaitaan yllättävä tulos. Tuulen aiheuttamien vikojen vikataajuus tien varressa on kaksinkertainen metsään verrattuna. Tuloksesta ei kuitenkaan ole syytä tehdä suurempia johtopäätöksiä otannan ollessa näin pieni.

Taulukko 7.7. Tuulesta aiheutuneet pysyvät viat molempien sähköasemien lähdöillä

	Pysyvät viat [kpl]			Johtopituudet [km]			Vikataajuus [kpl / 100 km / a]		
	metsä	tienvarsi	avomaa	metsä	tienvarsi	avomaa	metsä	tienvarsi	avomaa
Sähköasema A									
Lähtö 3	2	0	0	12.2	3.1	7.8	8.20	0.00	0.00
Lähtö 4	1	0	0	37.0	7.1	26.1	1.35	0.00	0.00
Lähtö 5	1	0	0	25.6	3.9	6.3	1.95	0.00	0.00
Yhteensä	4	0	0	74.8	14.1	40.2	2.67	0.00	0.00
Sähköasema B									
Lähtö 1	3	0	0	162.1	27.9	14.9	0.93	0.00	0.00
Lähtö 2	1	0	0	64.4	6.9	7.4	0.78	0.00	0.00
Lähtö 3	4	2	0	130.2	38.0	11.4	1.54	2.63	0.00
Lähtö 4	1	0	0	39.3	4.5	3.9	1.27	0.00	0.00
Lähtö 5	3	4	0	154.2	67.4	14.2	0.97	2.97	0.00
Yhteensä	12	6	0	550.2	144.7	51.8	1.09	2.07	0.00

7.2.2 Tuulen aiheuttamat lyhyet keskeytykset

Kuvien 5.5 ja 5.6 perusteella havaitaan tuulen aiheuttavan suhteessa yhtä paljon pika- sekä aikajälleenkytkentöjä. Diplomityössä on oletettu, että tuuli ei aiheuta vikoja avomaalla. Tuulen johdosta avojohtoverkkoon aiheutuneet jälleenkytkennöillä selvinneet viat ovat luultavimmin aiheutuneet puun oksan hetkellisestä osumisesta jännitteiseen osaan. Vian selviäminen tapahtuu pikajälleenkytkennällä, mikäli oksa ainoastaan hetkellisesti osuu johtimeen. Yhtäjaksoisen, kovan tuulen aikana oksa ehtii mahdollisesti poistua vasta aikajälleenkytkennän aikana.

Molempien sähköasemien lähdöillä tuulen aiheuttamille jälleenkytkennöille tehtiin regressioanalyysi, mutta riippuvuutta ympäristölle ei saavutettu. Lähteessä [Kan 07] tutkittiin tuulen nopeuden sekä jälleenkytkentämäärien riippuvuutta, eikä selvää tulosta saatu. Ilmeisesti tuulen aiheuttamiin lyhyisiin keskeytyksiin vaikuttavat monet tekijät. Muun muassa johtokadun raivausvuodella, metsätyypillä sekä puuston iällä on vaikutusta.

7.2.3 Korkeuden vaikutus tuulen aiheuttamiin vikoihin

Luvussa 6 todettiin, että Sähköaseman A alueella maanpinnan vaihtelut ovat hyvin pieniä, kun taas Sähköaseman B alueella korkeusvaihtelut olivat paikoitellen suuria. Oletettavaa olisi, että korkeammilla alueilla myös tuulen nopeus kasvaisi. Toisaalta Sähköaseman A alueella avomaan osuus on hyvin suuri. Avomaalla myös tuulen nopeudet ovat suuremmat kuin metsässä. Sähköasemilla säämittausten perusteella ei havaita merkittäviä eroja tuulten keskimääräisissä nopeuksissa, joten mahdolliset erot vika- ja jälleenkytkentäaajuuksissa selittyvät ympäristöolosuhteilla.

Pysyvien vikojen tarkastelussa ei havaittu merkittäviä eroja sähköasemien lähtöjen välillä. Tarkastellaan seuraavaksi lyhyitä keskeytyksiä. Lasketaan jälleenkytkentäaajuudet käyttäen johtopituuksina pelkästään metsä- ja tienvarsiosuuksia. Oletetaan siis, että avomaalla tuuli ei voi aiheuttaa vikoja.

Sähköaseman A lähtöjen jälleenkytkentäaajuudeksi saadaan 9.8 kpl/100 km/a, kun vastaava luku Sähköaseman B lähdöillä on 9.6 kpl/100 km/a. Molemmilla sähköasemien lähdöillä tuuli aiheuttaa keskimäärin saman verran jälleenkytkentöjä. Näin ollen vikojen riippuvuutta korkeudesta ei voida määritellä.

7.3 Lumi / jää

7.3.1 Lumen aiheuttamat pysyvät viat

Talvella esiintyi huomattavasti pysyviä vikoja, jotka ovat luokiteltu 'lanka orrella'. Tapahtuma ei välttämättä aiheuta heti käyttökeskeytystä jakeluverkossa, jossa pylväävät ovat maadoittamattomia. Kyseisen vian on arvioitu aiheutuvan johtimen päälle kertyneen lumen tippumisesta pois johdon päältä. Tällöin johto alkaa värähdellä, synnyttäen johtimen sekä eristimen liitoskohtaan mekaanisen rasituksen. Ajan myötä liitoskohta antaa periksi aiheuttaen johtimen irtoamisen eristimeltä. Uusilla johto-osuuksilla tämänkaltaiset viat ovat harvinaisia. Johtimen irtoaminen eristimeltä vaatii vuosien tai jopa vuosikymmenten aikana tapahtuneet mekaaniset rasitukset. [Ter 07]



Kuva 7.9. Mahdollisesti lumikuorman rasituksen aikana orrelta irronnut eristin. Kuva Arvo Oikarinen

Suurin osa tarkastelluista lumen ja jään aiheuttamista vioista johtui puun taipumisesta johtimiin. Avomaalla lumen ja jään aiheuttamia vikoja voivat olla ainoastaan lumen painosta katkenneet tai eristimiltä irronneet johtimet. Mahdollista on, että avomaalla tuuli estää lunta kertymästä johdinten päälle.

Taulukossa 7.8 on esitetty lumen aiheuttamat pysyvät viat Sähköaseman B lähdeillä. Lähdeillä 3 lumen aiheuttamia pysyviä vikoja on ollut suhteellisen vähän verrattuna

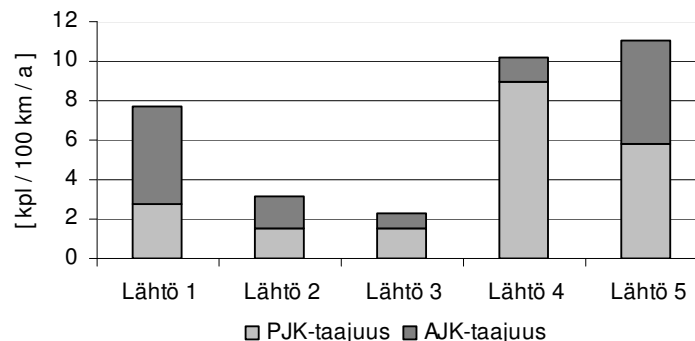
muihin lähtöihin. Yllättävää on tien varressa tapahtuneiden pysyvien vikojen vähyys. Metsässä puut ympäröivät avojohtoa molemmilta puolelta, kun tien varressa vain toiselta puolelta. Riski puun taipumiselle avojohdon päälle pitäisi teoriassa olla puolet tien varressa metsään verrattuna. Tien varressa mahdolliset vikatapaukset havaitaan helpommin etukäteen huoltomiesten ja sivullisten toimesta. Mahdolliset vian aiheuttajat ehditään poistaa ennen keskeytystä.

Taulukko 7.8. Lumen aiheuttamat pysyvät viat eri ympäristöissä

	Pysyvät viat [kpl]			Johtopituudet [km]			Vikataajuus [kpl / 100 km / a]		
	metsä	tienvarsi	avomaa	metsä	tienvarsi	avomaa	metsä	tienvarsi	avomaa
Lähtö 1	16	0	0	162.1	27.9	14.9	4.94	0.00	0.00
Lähtö 2	9	0	1	64.4	6.9	7.4	6.99	0.00	6.76
Lähtö 3	3	0	0	130.2	38.0	11.4	1.15	0.00	0.00
Lähtö 4	5	0	0	39.3	4.5	3.9	6.36	0.00	0.00
Lähtö 5	17	2	0	154.2	67.4	14.2	5.51	1.48	0.00
Yhteensä	50	2	1	550.2	144.7	51.8	4.54	0.69	0.97

7.3.2 Lumen aiheuttamat lyhyet keskeytykset

Pysyvien vikojen tapauksessa lumen todettiin aiheuttavan vikoja käytännössä vain metsässä. Tämän perusteella oletetaan, että myös lyhyet keskeytykset ovat aiheutuneet metsässä. Kuvassa 7.10 on esitetty lumen aiheuttamat jälleenkytkentätaajuudet Sähköaseman B lähdeillä. Havaitaan, että jälleenkytkentätaajuudet vaihtelevat huomattavan paljon lähtökohtaisesti. Jälleenkytkentätaajuuksien ero johtunee monista tekijöistä. Pääsyyinä kuitenkin lienee ympäristöjen vaihtelevuus. Esimerkiksi puuston laatu ja ikä sekä talviolosuhteet vaihtelevat lähtökohtaisesti. Keskimäärin metsässä tapahtui lumen aiheuttamana noin 7 jälleenkytkentää sataa kilometriä kohden vuodessa.

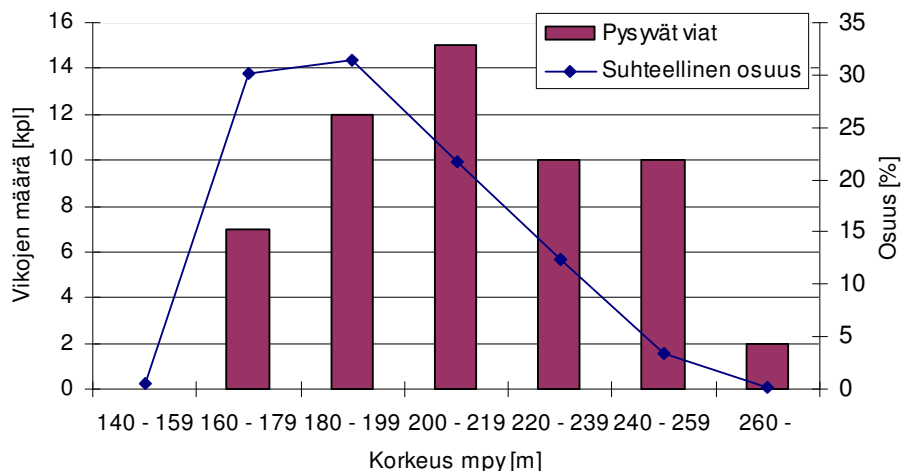


Kuva 7.10. Lumen aiheuttamat jälleenkytkennät Sähköaseman B lähdeillä

7.3.3 Korkeuden vaikutus lumen aiheuttamiin vikoihin

Tarkasteltaessa vikojen sijaintia, havaittiin lumen aiheuttavan huomattavasti enemmän pysyviä vikoja korkeiden vaarojen seuduilla. Ensinnäkin korkeille vaaroille lunta voi kertyä huomattavasti enemmän kuin alaville alueille. Toiseksi, tykkylumen muodostuminen vaatii erityiset sääolosuhteet.

Kuvassa 7.11 on esitetty Sähköaseman B lähdeillä tapahtuneet lumen aiheuttamat pysyvät viat sekä suhteelliset johto-osuudet eri korkeuksissa. Havaitaan, että 200 m mpy on raja-arvo, jonka jälkeen lumen aiheuttamat pysyvät viat yleistyvät. Esimerkiksi korkeudella 160 – 179 m mpy on tapahtunut 7 pysyvää vikaa lumen aiheuttamana. Tällä korkeudella sijaitsee noin 30 % avojohdoista. Vastaavasti korkeudella 240 – 259 m mpy on tapahtunut 10 pysyvää vikaa, kun kyseisellä korkeudella sijaitsee vain vajaa 5 % johdoista.



Kuva 7.11. Lumen aiheuttamat pysyvät viat sekä suhteelliset johto-osuudet eri korkeuksilla

7.4 Eläimet

7.4.1 Eläinten aiheuttamat pysyvät viat

Tarkastelujaksolla ilmeni vain kolme pysyvää vikaa, joiden aiheuttajana oli eläin. Näin pienellä otannalla ei ole järkevää tehdä analyysiä vikojen riippuvuudesta ympäristöstä. Pysyvä vika syntyy, kun eläin jää kosketuksiin jännitteiseen osaan. Kahden johtimen välille joutunut eläin luultavasti putoaa jälleenkytkennän aikana tai ehtii palaa pois.

Pysyvien vikojen kannalta vaarallisia paikkoja ovat muuntajan kannet, jonne eläimet voivat jäädä pysyvästi.

7.4.2 Eläinten aiheuttamat lyhyet keskeytykset

Sähköaseman A alueella 50 % jälleenkytkennöistä tapahtui syksyllä (elokuu – lokakuu), mikä viittaisi eläinten aiheuttamiin vikoihin. Aseman alueella sijaitsevat laajat peltoaukeat houkuttelevat muuttolintuja, jotka joutuessaan kosketuksiin jännitteisiin osiin aiheuttavat käyttökeskeytyksen. Keskimäärin eläimet aiheuttivat 23 jälleenkytkentää/100 km/a Sähköaseman A lähdoilla. Tarkempaa jaottelua eri ympäristöjen välille ei pystytty tekemään.

8 TULOSTEN HYÖDYNTÄMINEN

8.1 Verkko-omaisuuden hallinta

Verkko-omaisuuden hallinnalla pyritään lainsäädännön ja liiketoiminnallisten tavoitteiden puitteissa suunnittelemaan, rakentamaan sekä ylläpitämään optimaalinen verkko. Jakeluverkon tekninen pitoaika alkaa lähestyä loppuaan monissa jakeluverkkoyhtiöissä. Maaseutualueella toimivan verkkoyhtiön jakeluverkko sijaitsee enimmäkseen metsässä. Metsässä vika- sekä jälleenkytkentäaajuudet ovat selkeästi suuremmat kuin tien varressa tai avomaalla. Avojohton siirtäminen metsästä tien varteen on luotettavuuden kannalta järkevää, mutta se aiheuttaa muun muassa uusia lupakäsittelyjä maankäytölle. Metsässä johtokadut ovat valmiina uutta johtoa varten. Jakeluverkkoa rakennettaessa vanhalle johtokadulle, tulee asiakkaille pystyä syöttämään sähköä varayhteyksiä pitkin uuden verkon rakentamisen ajan. Säteittäisesti syötetyllä johdolla tämä vaatii erityisjärjestelyjä.

Verkkoliiketoiminnassa investoinnit eroavat hyvin paljon monesta muusta liiketoiminnasta. Investointeja joudutaan tekemään harvoin yhteen kohteeseen, mutta vastaavasti investoinnit ovat hyvin laajoja. Maaseutualueella kulutuksen kasvu voi myös olla negatiivista, mikä on huomioitava investointipäätöstä tehtäessä. Investointivaihtoehdon kokonaiskustannukset muodostuvat kaavan 8.1 perusteella.

$$K_{TOT} = \sum (K_{inv} + K_{kesk} + K_{kaytto} + K_{huolto}) \quad (8.1)$$

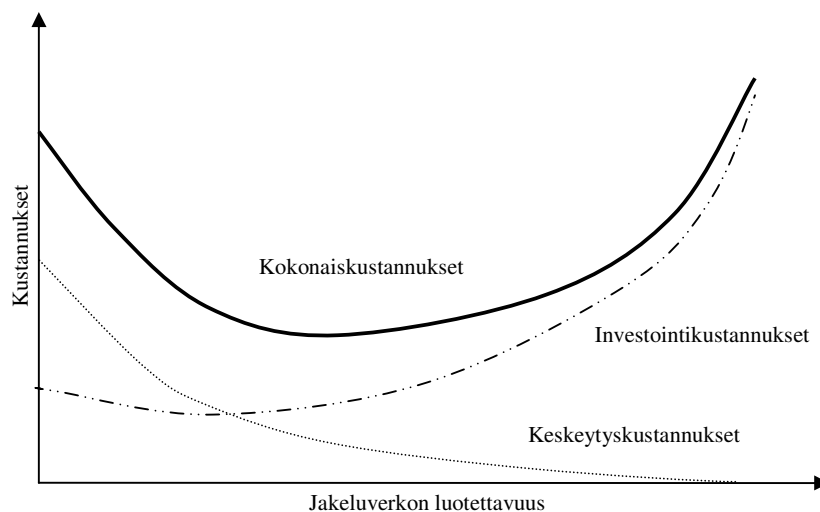
K_{inv} = Investointikustannukset

K_{kesk} = Keskeytyskustannukset

K_{kaytto} = Käyttökustannukset

K_{huolto} = Ylläpitokustannukset

Usein verkkoliiketoimintaa pidetään taloudellisesti pieniriskisenä liiketoimintamuotona. Verkkoyhtiöiden on kuitenkin pystyttävä kehittämään palvelujaan samalla, kun menoja pitäisi vähentää. Tämä johtaa siihen, että tulevaisuuden investointipäätöksissä keskeytyskustannuksien arvioinnilla on merkittävä rooli. Kokonaiskustannuksiin eniten vaikuttavat investointi- sekä keskeytyskustannukset. Näiden optimaalisen suhteen löytäminen on tärkeää. Tilannetta selvennetään kuvassa 8.1.

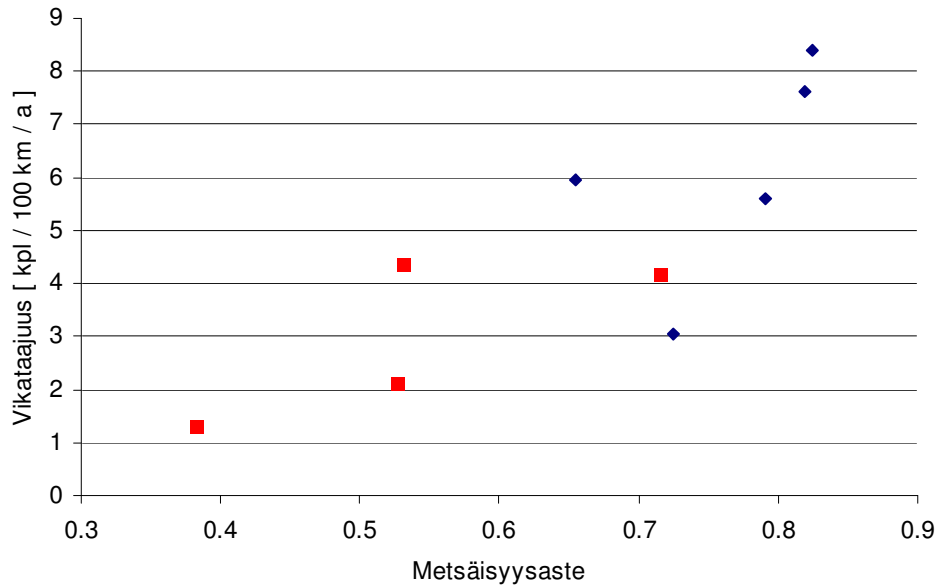


Kuva 8.1. Investointi- ja keskeytyskustannusten arviointi investointipäätöksessä

8.2 Vikataajuus

Jotta osataan arvioida keskeytyskustannuksia, on tiedettävä vikataajuudet eri ympäristöissä. Verkon tähtipisteen maadoituksella sekä ylijännitesuojauksella ei suuressa määrin ole vaikutusta pysyvien vikojen selvittämisessä. Seuraavassa tarkastellaankin molempien sähköasemien johtolähdöillä tapahtuneita pysyviä vikoja yhdessä.

Kuvassa 8.2 on esitetty salamoiden, tuulen, lumen sekä eläinten aiheuttamien pysyvien vikojen vikataajuudet metsäisyysasteen funktiona. Metsäisyysaste on saatu jakamalla kunkin johtolähdön metsässä sijaitseva osuus koko lähdön pituudella. Tarkastelusta on jätetty pois muun muassa rakenneviat sekä ihmisten vahingossa aiheuttamat viat, koska on oletettu, ettei ympäristöllä ole niihin vaikutusta. Ilmeistä on, että vahingossa kaadetut puut linjalle ovat ongelma metsässä ja tien varressa, mutta vastaavasti pellolla maanviljelyksestä aiheutuu myös ihmisten aiheuttamia vikoja. Näin ollen on perusteltua unohtaa ne ympäristön vaikutuksen arvioinnissa.



Kuva 8.2. Vikataajuuden ja metsäisyyden korrelaatio. Metsäisyysaste 1 vastaa koko lähdön sijaitsemista metsässä. Sähköaseman A lähdöt merkitty punaisella sekä Sähköaseman B lähdöt sinisellä.

Näin lyhyellä tarkastelujaksollakin saadaan selvä korrelaatio vikataajuuden ja metsäisyyden välille. Lähdöillä, joilla johto on lähes kokonaan metsässä, aiheutuu lähes kymmenen pysyvää vikaa sataa kilometriä kohden vuodessa. Vastaavasti lähdöillä, joilla metsän osuus on noin puolet koko pituudesta, vikoja esiintyy noin puolet vähemmän. Luvut ovat suuria, koska nyt tarkastelussa on otettu huomioon myös hallitut keskeytykset eli viat, jotka eivät ole ehtineet aiheuttaa käyttökeskeytystä.

Taulukossa 8.1 on esitetty molempien sähköasemien syöttämien lähtöjen pysyvien vikojen vikataajuudet tarkastelujaksolla. Sähköaseman A lähtö 2 on jätetty pois tarkastelusta, koska siellä ei tarkastelujaksolla tapahtunut yhtään pysyvää vikaa.

Taulukko 8.1. Vikataajuudet molempien sähköasemien lähdoillä

	Pysyvät viat [kpl]			Johtopituudet [km]			Vikataajuus [kpl / 100 km / a]		
	metsä tienvarsi avomaa			metsä tienvarsi avomaa			metsä tienvarsi avomaa		
Sähköasema A									
Lähtö 1	2	0	0	14.7	9.4	14.3	6.80	0.00	0.00
Lähtö 3	3	0	2	12.2	3.1	7.8	12.30	0.00	12.82
Lähtö 4	2	0	3	37.0	7.1	26.1	2.70	0.00	5.75
Lähtö 5	3	0	0	25.6	3.9	6.3	5.86	0.00	0.00
Yhteensä	10	0	5	89.5	23.5	54.5	5.59	0.00	4.59
Sähköasema B									
Lähtö 1	22	0	2	162.1	27.9	14.9	6.79	0.00	6.71
Lähtö 2	17	0	1	64.4	6.9	7.4	13.20	0.00	6.76
Lähtö 3	9	2	1	130.2	38.0	11.4	3.46	2.63	4.39
Lähtö 4	7	0	1	39.3	4.5	3.9	8.91	0.00	12.82
Lähtö 5	28	7	0	154.2	67.4	14.2	9.08	5.19	0.00
Yhteensä	83	9	5	550.2	144.7	51.8	7.54	3.11	4.83

Metsässä Sähköaseman A lähdoillä pysyviä vikoja tapahtui keskimäärin 5.6 kpl/100 km/a, kun vastaava luku Sähköaseman B lähdoillä oli 7.5 kpl/100 km/a. Sähköaseman A lähdoillä ei teiden varsilla tapahtunut yhtään vikaa, mutta tarkastelujakson kesto ja teiden varsien pieni osuus selittävät asiaa. Sähköaseman B lähdoillä tien varrella pysyviä vikoja tapahtui 3.1 kpl/100 km/a, mikä on noin puolet metsän vikataajuudesta.

Liitteessä 6 on esitetty erään tarkastelussa olleen johtolähdön pysyviä vikoja eri ympäristöissä. Tien varrella sijaitsevalla avojohdolla ei tapahtunut ainoatakaan pysyvää vikaa tarkastelujaksolla. Vastaavasti metsäisillä osuuksilla näitä oli tapahtunut lukuisia. Metsä- ja tienvarsiosuuksien välinen etäisyys toisistaan ei ole suuri, joten vallitsevat sääolosuhteetkaan tuskin ovat paljoa vaihdelleet. Avojohtoon sijoittaminen teiden varsille on tässä diplomityössä saatujen tulosten perusteella kannattavinta luotettavuuden kannalta.

Yllättävää on avomaalla tapahtuneiden pysyvien vikojen lukumäärä. Molempien sähköasemien lähdoillä vikataajuus oli tarkastelujaksolla yli 4.5 kpl/100 km/a. Sähköaseman A lähtöjen osalta tämä selittyy maanviljelyksen aiheuttamina vahinkoina. Sähköaseman B viidestä avomaalla tapahtuneesta pysyvästä viasta kolme aiheutui salamasta ja yksi lumesta. Tämä osoittaa sen, että avomaalla sijaitseva avojohdot ei ole täysin turvassa luonnoltakaan.

On kuitenkin muistettava, että ilmastolliset tekijät, ja näin ollen myös vikataajuudet, vaihtelevat vuosittain. Tässä diplomityössä tarkastelujakso oli kaksi vuotta, johon mahtui yksi huomattava tykkylumikausi sekä muutama voimakkaampi myrsky. Esimerkiksi ilman kyseistä tykkylumikautta, vikataajuudet olisivat huomattavasti pienemmät metsän osalta. Jos halutaan saada luotettavat arviot vikataajuuksista eri ympäristöissä, on tarkastelujakson oltava huomattavasti pitempi, jolloin sattuman osuus vähenee. Lisäksi on muistettava, että vikataajuudet vaihtelevat alueittain. Verkkoyhtiön tekemät arviot omista vikataajuuksista eivät välttämättä päde toisen yhtiön alueelle, koska esimerkiksi salamaniskutiheydet, tykkylumelle otolliset olosuhteet sekä lintujen muuttoreitit vaihtelevat alueittain.

8.3 Verkkotietojärjestelmä

Tämän diplomityön yhtenä tarkoituksena oli pohtia, kuinka verkkotietojärjestelmää voitaisiin paremmin hyödyntää verkon suunnittelussa ja ylläpidossa. Verkkotietojärjestelmällä on monta käyttötarkoitusta. Sillä voidaan hallita jakeluverkon seurantalaskelmia, kuten maksimitehoja, jännitteenalennemisiä sekä vikavirtoja. Toisaalta sitä voidaan käyttää myös apuna verkon suunnittelussa.

8.3.1 Verkkotietojärjestelmän hyödyntäminen investointipäätöksissä

Verkkotietojärjestelmää, joka hyödyntää karttapohjaa, voitaisiin periaatteessa käyttää apuna investointipäätösten tekemisessä. Yksi hyvä keino käsitellä ympäristöä, olisi jakaa maa-alueet ruudukoihin, joiden ympäristöolosuhteiksi määriteltäisiin metsä, tienvarsi ja avomaa. Jokaiselle ympäristöolosuhteelle määriteltäisiin vielä keskimääräiset vika- ja jälleenkytkentätaajuudet. Asetettujen tietojen jälkeen karttapohjan päälle voitaisiin suunnitella eri johtoreittejä, joille verkkotietojärjestelmä laskisi ainakin investointi- sekä keskeytyskustannukset johtopituuksien ja ympäristöjen perusteella. Ruudukoihin voisi myös määritellä maanpinnan korkeustiedot, jolloin varsinkin lumen aiheuttamia vikoja voitaisiin verkon suunnittelussa välttää.

Karttapohjan hyödyntäminen investointipäätöksissä kuulostaa yksinkertaiselta, mutta käytännössä siihen liittyy monta ongelmaa. Jos karttapohja jaetaan ruudukoihin, on yksittäisen ruudun ympäristöolosuhteen selvittäminen työlästä. Toisaalta ympäristö alueella muuttuu ajan myötä, josta aiheutuu ympäristöolosuhteiden jatkuvaa päivittämistä

verkkotietojärjestelmään. Hyviä keinoja ympäristöolosuhteiden selvittämisessä ovat helikopterista otetut ilmakuvat sekä Internetistäkin löytyvät ilmaiset satelliittipalvelut.

Yhden ruudun pinta-ala ei saa olla kovin suuri, sillä muuten tuloksien tarkkuus kärsii. Jakeluverkossa pylväiden välinen etäisyys, jännepituus, on keskimäärin noin 70 m. Yhden ruudun reunan tulisi olla jännevälin kanssa suunnilleen samassa suhteessa, jotta verkon tarkkaa kulkemista eri ympäristöissä olisi mahdollista mallintaa. Näin ollen ruudukon reunapituus ei saisi kasvaa yli 100 m.

8.3.2 Vikapaikan nopeampi paikallistaminen

Kun valvomoon saapuu tieto pysyvästä viasta joko katkaisijan laukeamisen tai asiakasilmoituksen myötä, aloitetaan vikapaikan paikallistaminen. Apuna tässä käytetään vikavirtalaskelmia, kauko-ohjattujen erottimen tilatietoja sekä asiakasilmoituksia.

Verkkotietojärjestelmää voitaisiin hyödyntää enemmän vikapaikan löytämisessä. Kun verkkotietojärjestelmään on lisätty ympäristöolosuhteet, on esimerkiksi myrskyn aikana todennäköisempää, että vika on sattunut metsässä kuin avomaalla. Usein myös tietty vikatekijä aiheuttaa vikoja samoilla alueilla. Tarkastelujaksolta löytyi etenkin lumen aiheuttamille vioille herkkiä alueita korkeilta vaaroilta. Kun historiatiedot sekä ympäristöolosuhteet yhdistetään vikavirtalaskelmiin sekä asiakasilmoituksiin, voidaan pysyvä vika paikallistaa nopeammin.

Verkkotietojärjestelmässä voidaan hyödyntää GPS-paikannusta. Tämän avulla verkko saadaan tarkasti piirrettyä kartalle. GPS-mittauksella voitaisiin saada myös tiedot maanpinnan korkeudesta eri verkon osissa. Ainakin lumen todettiin aiheuttavan vikoja korkeilla alueilla. Mikäli jakeluverkon alueella esiintyy paljon lumiongelmaa, on niitä kannattavaa lähteä paikallistamaan korkeilta alueilta ensimmäisenä.

8.3.3 Tarvittavat lisäykset verkkotietojärjestelmään

Jakeluverkolle tehdään kuntotarkastuksia sekä johtokadun raivauksia tietyn väliajoin. Raivauksen osalta aikajakso on noin viisi vuotta. Samalla voitaisiin kerätä tiedot ympäristöolosuhteista sekä lisätä ne verkkotietojärjestelmään. Luokittelu olemassa oleviin ympäristöolosuhteisiin voitaisiin tehdä jaotteleamalla ympäristö tämän diplomityön tapaan

metsään, tien varteen sekä avomaahan. Käytännössä kerättäisiin tieto siitä, onko puun kaatuminen avojohdon jäniteelle mahdollista kahdelta (=metsä), yhdeltä (=tienvarsi) vai ei kummaltakaan (=avomaa) puolelta. Ympäristö ei paljoa ehdi muuttua viiden vuoden aikavälillä, jos ei avohakkuita oteta huomioon.

Pysyvien vikojen tapauksessa huoltomiehistö on yleensä kirjannut vian aiheuttajan, mikäli se on selvästi ollut havaittavissa. Vikojen aiheuttajista saadaan arvokasta tietoa ennakoitaessa tulevia vikoja. Liitteessä 7 on esitetty häiriöilmoitusraportti, jonka huoltomiehet täyttävät pysyvän vian yhteydessä. Tärkeitä tietoja ilmoituksessa luotettavuustarkastelussa ovat vian aiheuttaja, vikapaikka (avojohdo, jakelumuuntamo, sähköasema...) sekä vian aikatiedot (etsintä- ja korjausaika). Raporttipohjaan olisi syytä merkitä vielä ympäröivä ympäristöolosuhde.

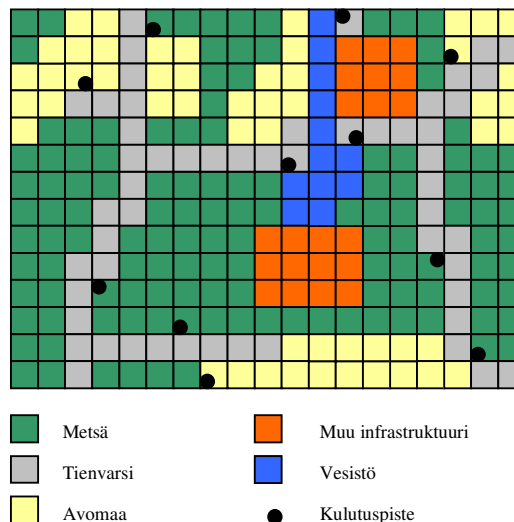
Tarkastellusta aineistoista löytyi pysyviä vikoja, joiden aiheuttajaksi oli luokiteltu 'puu linjassa'. Jälkikäteen tehdyssä tarkastelussa on mahdotonta sanoa, onko vian aiheuttanut lumi, tuuli vai huolimaton puunkaato. Vikojen aikatietojen avulla voidaan arvioida eri aiheuttajien keskimääräisiä korjausajoja. Esimerkiksi eläinten aiheuttamat viat selvinnevät nopeammin kuin lumen aiheuttamat viat. Aikatietoja käytetään keskeytyskustannusten laskemisessa.

Etenkin suurhäiriöiden aikana huoltomiehistön tärkein tehtävä on saada verkko nopeasti toimintakuntoon, jolloin vikojen tarkempi analysoiminen jää vähemmälle. Vikojen keskittyessä pienelle alueelle, ovat huoltomiehet usein kirjanneet yhden pysyvän vian piiriin monta vikaa. Aineistosta löytyikin myrskyn ja lumikuorman aikaisia vikoja, joissa vian syyksi on kirjattu esimerkiksi 'neljä puuta kaatunut johdon päälle'.

Suurhäiriöiden ja pitempien myrskyjen aikana kyseinen luokittelu on kuitenkin riittävä. Asiakkaalle aiheutuisi keskeytys jo yhdestäkin kaatuneesta puusta. Ainoastaan pysyvän vian aiheuttaman sähkökatkon kesto aika asiakkaalla kasvaa. Aineistosta havaittiin pysyvien vikojen korjausajojen vaihtelevan huomattavasti. Yli 12 tunnin keskeytykset olivat harvinaisia. Hallittujen keskeytysten korjausajat olivat reilusti alle tunnin. Huoltomiehistö on tällöin havainnut vian tarkastuskierroksella ja ovat korjanneet sen. Pysyvien vikojen keskimääräisiä kestoja ei tässä diplomityössä tutkittu, koska edellä mainitut asiat vääristivät tulosta.

8.4 Esimerkki investointivaihtoehtojen vertailusta

Kuvassa 8.3 on esitetty kuvitteellinen lähtötilanne verkon suunnittelulle ja rakentamiselle. Karttapohja on jaettu ympäristöolosuhteisiin ruudukoihin. Lisäksi kartalle on sijoitettu muut mahdolliset alueet, kuten vesistöt sekä muu infrastruktuuri. Jälkimmäisellä tarkoitetaan tässä tapauksessa maa-alueita, jonne jakeluverkkoa ei ole mahdollista sijoittaa. Näitä alueita ovat esimerkiksi lentokentät ja luonnonsuojelualueet. Jokaiselle ympäristöolosuhteelle on asetettu vika- ja jälleenkytkentäaajuus. Kulutuspisteet on merkitty pisteillä, jotka oikeassa tapauksessa sisältäisivät yksittäiset tiedot kulutustyyppistä ja tehosta. Skenaariossa sähköaseman oletetaan sijaitsevan alueen pohjoispuolella sekä kulutuksen jatkuvan alueen eteläpuolella. Tarkoitus on optimoida reittivalinta niin, että kokonaiskustannukset minimoidaan verkon pitoajalta.



Kuva 8.3. Kuvitteellinen lähtötilanne investointipäätöksen tekemiseen

Edellä esitettyä optimointiongelmää voidaan lähteä ratkaisemaan verkkotietojärjestelmän avulla. Kartan päälle jakeluverkkoa suunniteltaessa, verkkotietojärjestelmä laskee automaattisesti kustannukset verkon pitoajalta. Investointikustannukset saadaan johtokilometrien ja käytettyjen komponenttien hintatietojen perusteella. Keskeytyskustannukset puolestaan saadaan johtokilometrien ja keskimääräisten vika- sekä jälleenkytkentäaajuuksien avulla. Kuvassa 8.4 on esitetty kaksi erilaista investointivaihtoehtoa.

9 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Haja-asutusalueella avojohto säilyttäneen asemansa käytetyimpänä johdintarjauksena lähitulevaisuudessa, vaikka mielenkiinto PAS-johtoa sekä maa- että ilma-kaapelia kohtaan on lisääntynyt. Verkkoyhtiöillä on edessä mittavat saneeraustoimenpiteet, kun enimmäkseen 1960- ja 1970-luvulla rakennetun jakeluverkon tekninen pitoaika lähestyy loppuaan. Lisäksi nyky-yhteiskunta tarvitsee yhä luotettavampaa sähkön jakelua, mikä näkyy kiristyneessä regulaatiomallissa. Verkkoyhtiö joutuu maksamaan asiakkaille korvauksia yhä lyhyemmistä sähkönjakelun keskeytyksistä. Aineiston perusteella havaittiin, että aikajälleenkytkennöistä yli kolmannes on turhia.

Verkon oikealla sijoituspaikalla voidaan vaikuttaa jakeluverkon luotettavuuteen. Diplomityössä saatujen tulosten perusteella voidaan sanoa, että jakeluverkon sijoittaminen teiden varsille parantaa jakeluverkon luotettavuutta eniten. Lisäksi pysyvien vikojen havaitseminen ja korjaaminen nopeutuu. Vikataajuuksille eri ympäristöissä saatiin seuraavat arvot. Ensimmäinen luku kuvaa Sähköaseman A lähtöjä ja jälkimmäinen puolestaan Sähköaseman B lähtöjä. Sähköaseman A aineisto ei salamoiden ja lumen aiheuttamien pysyvien vikojen osalta ollut riittävä, joten tarkastelu on tehty vain Sähköaseman B lähdöille, joita yksittäinen luku kuvastaa.

- Metsä (5.6...7.5 vikaa/100 km/a)
 - salama (0.2 vikaa/100 km /a)
 - tuuli (2.7...1.1 vikaa/100 km/a)
 - lumi (4.5 vikaa/100 km/a)
- Tienvarsi (0.0...3.1 vikaa/100 km/a)
 - salama (0.35 vikaa/100 km/a)
 - tuuli (0.0...2.1 vikaa/100 km/a)
 - lumi (0.7 vikaa/100 km/a)
- Avomaa (4.6...4.8 vikaa/100 km/a)
 - salama (2.9 vikaa/100 km/a)
 - tuuli (0.0...0.0 vikaa/100 km/a)
 - lumi (1.0 vikaa/100 km/a)

Pysyvien vikojen tarkastelussa havaittiin lumen aiheuttavan noin 50 % kaikista vioista. Lumen aiheuttamat pysyvät viat olivat harvinaisia tien varrella, koska tällöin mahdolliset vikatapaukset havaitaan ja estetään etukäteen. Jos avojohto on kuitenkin sijoitettava metsään, kannattaa johtokatua leventää sekä pylväiden korkeutta kasvattaa. Lumen aiheuttamat pysyvät viat esiintyivät korkeilla alueilla (> 200 m mpy). Korkeilla alueilla lunta saattaa tulla huomattavasti enemmän kuin alavilla alueilla. Ilmeisesti myös tykkylumelle otolliset ilmasto-olosuhteet täyttyvät korkeammilla alueilla. Etenkin korkeiden vaarojen alueilla avojohto kannattaa sijoittaa tien varteen.

Lyhyitä keskeytyksiä aiheuttivat Sähköaseman A alueella eniten eläimet ja Sähköaseman B alueella salamat. Salamaniskutiheys oli huomattavasti suurempi Sähköaseman B alueella, mikä selittää eroja. Siellä lähes 50 % lyhyistä keskeytyksistä aiheutui salamoista. Salamoiden aiheuttamat lyhyet keskeytykset vähentyvät huomattavasti, kun ylijännitesuojina käytetään puoliventtiilisuoja kipinävälien sijasta. Tehdyn teoreettisen tarkastelun perusteella puoliventtiilisuojaat selviävät valtaosasta salamoiden aiheuttamista indusoituneista ylijännitteistä. Salamoiden suoralle osumiselle avojohtoverkkoon tehtiin teoreettinen tarkastelu. Tällöin havaittiin, että metsässä ja tien varressa jakeluverkko on hyvin suojassa suorilta iskuilta.

Verkkoyhtiön kannattaa panostaa ylijännitesuojaukseen, jos salamaniskutiheys alueella on suuri. Jos salamoita ei alueella paljoa esiinny, jälleenkytkentöjä voidaan vähentää tähtipisteen kompensoinnilla. Sammutetussa jakeluverkossa esiintyi noin neljännes vähemmän sekä pika- että aikajälleenkytkentöjä kuin maasta erotetussa verkossa.

Sähköverkkoliiketoiminnassa investoinnit ovat usein kalliita ja pitkät pitoajat lisäävät tulevaisuuden tuomia riskejä. Investointipäätöksissä tarkoitus on minimoida kokonaiskustannukset verkon pitoajalta. Tähän asti investointikustannuksilla on ollut merkittävin rooli investointipäätöstä tehtäessä. Kiristytvä regulaatiomalli kuitenkin kasvattaa keskeytyskustannuksia.

Diplomityössä pohdittiin verkkotietojärjestelmään integroidun karttapohjan hyödyntämistä investointipäätöksissä. Karttapohja voitaisiin jakaa kolmeen ympäristöolosuhteeseen, jotka olisivat metsä, tienvarsi ja avomaa. Jokaiselle näistä määriteltäisiin vika- sekä jälleenkytkentäaajuudet. Verkkotietojärjestelmä osaisi

automaattisesti laskea kunkin karttapohjan päälle piirretyn reittivaihtoehdon investointi- ja keskeytyskustannukset. Ympäristöolosuhteiden lisääminen järjestelmään on työlästä. Teknistä toteutusta olisi syytä miettiä vielä tarkemmin.

Tulevaisuudessa vastaavanlainen tarkastelu ympäristön vaikutuksesta PAS-johtimien sekä ilmakaapelin tapauksessa olisi kannattavaa. Tällöin verkkotietojärjestelmän avulla tapahtuvaan verkon suunnitteluun voitaisiin lisätä useampien verkkoratkaisujen vertaileminen. Lisäksi vika- ja jälleenkytkentätaajuuksien tarkastelussa tulisi saada käyttöön laajempi aineisto, sillä vuosittaiset vaihtelut vikamäärissä ovat huomattavat. Pysyvien vikojen tapauksissa on tärkeää määritellä vikapaikan ympäristö sekä vian aiheuttaja.

LÄHTEET

- [Abb 00] ABB: *Abb:n TTT-käsikirja 2000-07*. Saatavissa osoitteesta: <http://www.abb.com/cawp/fiabb255/816ed499bb0d20a8c2256936003e64ed.aspx>
- [Ala 06] Alanen R., Hätönen H.: *Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinta: State of art –selvitys*. VTT Working papers 52. Espoo 2006.
- [Aro 03] Aro M., Elovaara J., Karttunen M., Nousiainen K., Palva V.: *Suurjännitetekniikka*. Otatieto Oy, 2. painos, 2003. 520 s.
- [Cho 95] Chow M., Taylor L. S.: *Analysis and Prevention of Animal-Caused Faults in Power Distribution Systems*. IEEE, Vol 10, No 2, 04 1995.
- [Cig 91] CIGRE WG33.01: *Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines*. CIGRE Brochure 63, 1991.
- [Cir 97] Joint CIRED/CIGRE Working Group 05: *Protection of MV and LV Networks against Lightning*. Conference Publication No. 438. IEE 1997
- [Elo 88] Elovaara J., Laiho Y.: *Sähkölaitostekniikan perusteet*. Otakustantamo, 1988. 461 s.
- [Emv 07] Energiamarkkinaviraston julkaisuja. *Sähkön jakeluverkkotoiminnan hinnoittelun kohtuullisuuden arvioinnin suuntaviivat vuosille 2008-2011*. 30.6.2007. Saatavilla osoitteesta: <http://www.energiamarkkinavirasto.fi/data.asp?articleid=1381&pgid=230&languageid=246>
- [Ete 05] Energiateollisuus ry: *Keskeytystilasto-ohje 2005 v. 2.0*. Helsinki 2005.
- [Ete 07] Energiateollisuus ry: *Keskeytystilasto 2006*. Helsinki 2007.
Saatavissa osoitteesta: www.energia.fi/fi/tilastot/keskeytystilastot
- [Fra 96] Frazier S. D., Bonham C.: *Suggested Practices for Reducing Animal-Caused Outages*. IEEE Industry Applications Magazine, 07/08 1996.
- [Hei 05] Heine P., Turunen J., Lehtonen M., Oikarinen A.: *Measured Faults during Lightning Storms*. Russia, IEEE 2005.
- [Hei 06a] Heine P., Lehtonen M., Oikarinen A.: *Medium Voltage Faults during a Winter Period of Crown Snow*. The 5th International Conference of Electric Power Quality and Supply Reliability. Estonia 2006.

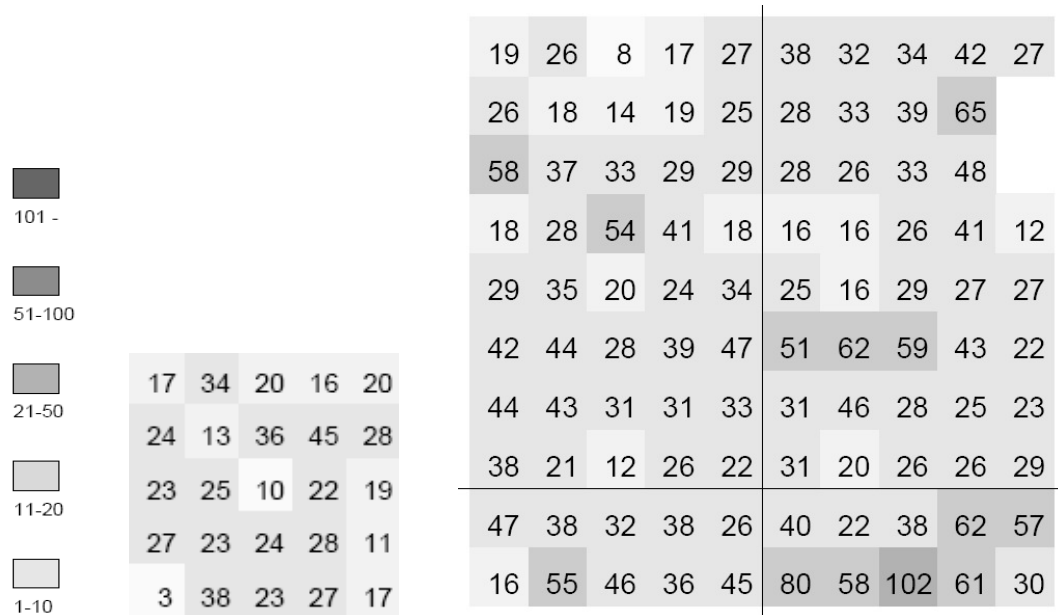
- [Hei 06b] Heine P., Lehtonen M.: *Pikajälleenkytkennät ja jännitekuopat*. TKK 2006.
- [Hop 05] Hoppula P., *Tykkylumi ja otolliset säätilanteet sen aiheuttamille puustovaurioille*. Pro gradu-tutkielma, HY 2005.
- [Hän 82] Hänninen K., *Voimansiirtojohtojen ukkoshäiriötiheyden tutkiminen*. Diplomityö, TKK 1982.
- [Jus 02] Jussila J., *Sähkönjakeluverkon yleissuunnittelumenetelmien kehittämisperiaatteet*. Diplomityö, TTKK 2005
- [Kan 07] Kananen R.: *Kannattavuusselvitys eri vaihtoehtoista vähentää lyhyitä sähkökatkoksia Kainuun Energian sähköverkkotoiminnassa*. Diplomityö, TKK 2007.
- [Ktm 06] Sähkön jakeluhäiriöiden ehkäisemistä ja jakelun toiminnallisia tavoitteita selvittäneen työryhmän raportti: *Sähkönjakelun toimitusvarmuuden kehittäminen*. Kauppa- ja teollisuusministeriön tutkimuksia ja raportteja. 2006.
- [Leh 96] Lehtonen M., Hakola T.: *Neutral Earthing and Power System Protection*. Vaasa 1996.
- [Lem 94] Lemström B., Lehtonen M.: *Kostnader för elavbrott*. TemaNord 1994:627, Nordisk Ministerråd. Copenhagen 1994.
- [Loh 05] Lohjala L.: *Haja-asutusalueiden sähkönjakelujärjestelmien kehittäminen – erityisesti 1000 V jakelujännitteen käyttömahdollisuudet*. Väitöskirja, LTY 2005.
- [Nis 03] Niskanen J.: *Sähkönjakelun toimitusvarmuuden parantaminen Graninge Kainuu Oy:n keskijänniteverkossa*. Diplomityö, TKK 2003.
- [Rei 07] Valvomoteknikko Ismo Reinikan (Kainuun Energia Oy) kanssa käymä sähköpostikeskustelu 21.10.2007
- [Sen 01] Sener ry: *Pikajälleenkytkentöjen aiheuttamat ongelmat ja niiden vähentäminen. Suositus hyväksyttävistä PJK-määristä*. 2001
- [Ter 07] Aluepäällikkö Markku Tervon (Kainuun Energia Oy) kanssa käyty keskustelu 23.11.2007.
- [Tik 94] Tikkanen M.: *Suomen pinnanmuodot (The Landforms of Finland)*. Terra vol 106:3, 1994.
- [Tuo 06] Tuomi T., Mäkelä A.: *Salamahavainnot 2006 / Lightning observations in Finland 2006*. Ilmatieteenlaitoksen julkaisuja 2006.

- [Tuo 07] Tuomi T.: *Ilmatieteenlaitokselta saatuja salamatietoja*.
Sähköpostikeskustelu Tapio Tuomen kanssa 25.10.2007.
- [Ver 05] Verho P., Pylvänäinen J., Järvinen J., Oravasaari M., Kunttu S.,
Sarsama J.: *Luotettavuuspohjainen verkostanalyysi (LuoVa) projektin
loppuraportti*. TTY-paino. Tampere 2005.

LIITE 1

Tarkastelussa olleiden sähköasemien likimääräisten johtoalueiden salamaniskutiheydet

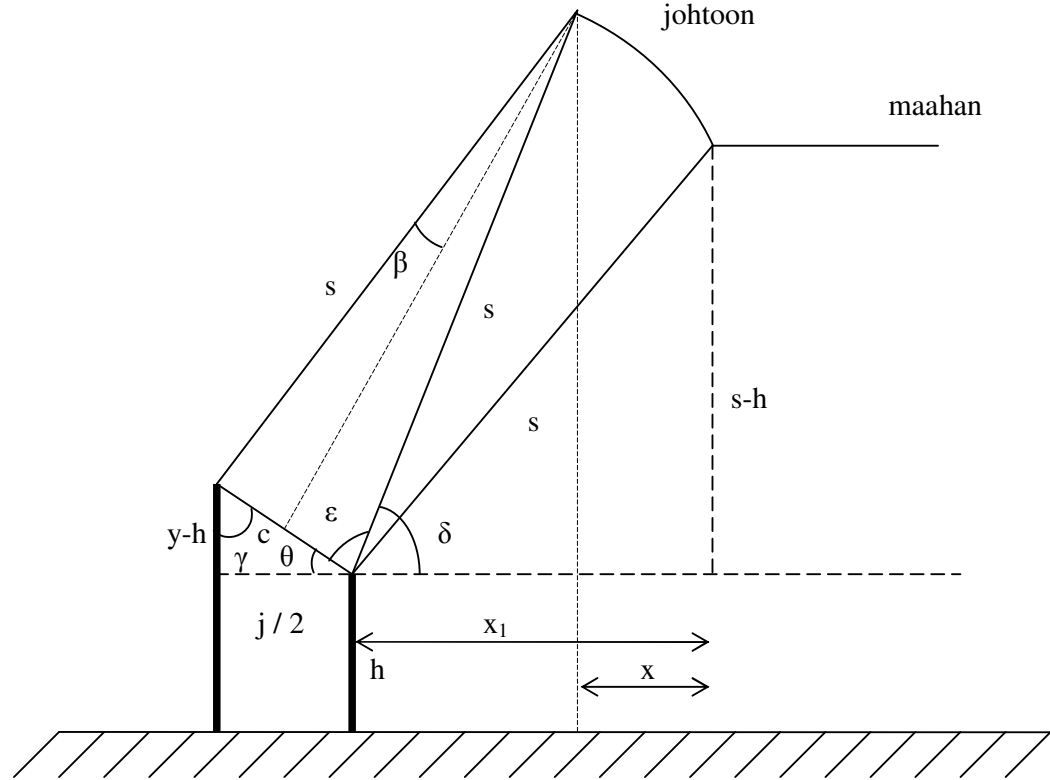
Kuvassa 1 on esitetty sähköasemien johtolähdöillä esiintyneet salamaniskut kahden vuoden tarkastelujaksolla sadan neliökilometrin ruudukoissa [Tuo 07]. Sähköaseman A alueen 25 ruudulle on osunut 573 salamaa, joten iskutiheydeksi saadaan 11 salamaa/100 km²/a. Sähköaseman B likimääräisen alueen 98 ruudulle on osunut 3346 salamaa, keskimääräisen iskutiheyden ollessa tällöin 17 salamaa/100 km²/a.



Kuva 1. Salamaniskutiheydet tarkasteltujen sähköasemien likimääräisillä lähdöillä kahden vuoden tarkastelujaksolla. Sähköaseman A alue vasemmalla ja Sähköaseman B vastaavasti oikealla.

LIITE 2

Teoreettinen tarkastelu salaman osumisesta suoraan avojohtoon tienvarsiympäristössä.



Kulmat:

$$\beta = \arcsin\left(\frac{c}{2s}\right) = \arcsin\left(\frac{\sqrt{\left(\frac{j}{2}\right)^2 + (y-h)^2}}{2s}\right)$$

$$\gamma = \arctan\left(\frac{j}{2(y-h)}\right) = \arcsin\left(\frac{j}{2c}\right) = \arcsin\left(\frac{j}{2\sqrt{\left(\frac{j}{2}\right)^2 + (y-h)^2}}\right)$$

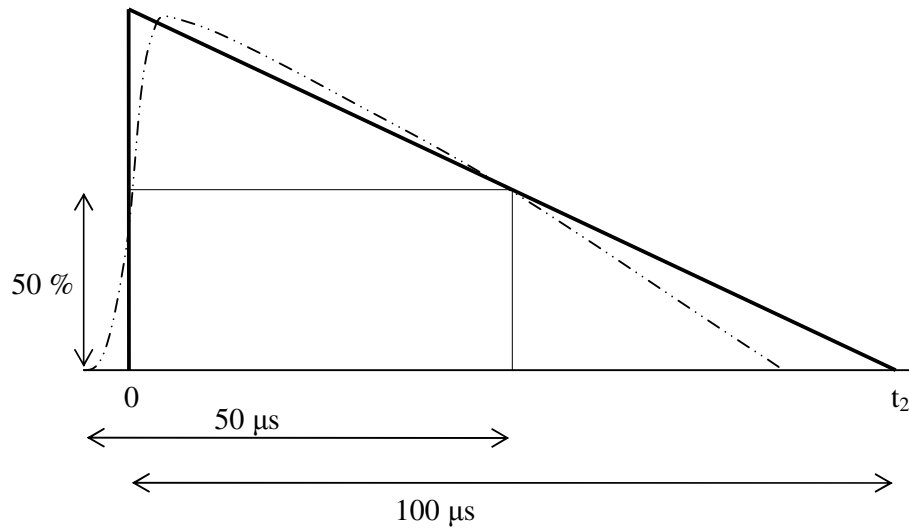
$$\delta = 180^\circ - \epsilon - \theta = 180^\circ - (90^\circ - \beta) - (90^\circ - \gamma) = \beta + \gamma$$

$$x = x_1 - s \cos \delta = \sqrt{s^2 - (s-h)^2} - s \cos \delta$$

$$x = \sqrt{s^2 - (s-h)^2} - s \cos \left(\arcsin\left(\frac{j}{2\sqrt{\left(\frac{j}{2}\right)^2 + (y-h)^2}}\right) + \arcsin\left(\frac{\sqrt{\left(\frac{j}{2}\right)^2 + (y-h)^2}}{2s}\right) \right)$$

LIITE 3

Salamaimpulssin sisältämän energian arviointi.



Kolmion hypotenuusan lauseke:

$$u \left(1 - \frac{t}{t_2} \right)$$

Energia puolestaan lasketaan seuraavasti:

$$W = Pt = \int_0^{t_2} ui \, dt = \int_0^{t_2} \left(\frac{u^2}{Z} \right) dt = \int_0^{t_2} \left(\frac{u^2 - 2 \frac{u^2 t}{t_2} + \frac{u^2 t^2}{t_2^2}}{Z} \right) dt$$

$$W = Pt = \frac{u^2}{Z} \int_0^{t_2} \left(1 - \frac{2t}{t_2} + \frac{t^2}{t_2^2} \right) dt = \frac{u^2}{Z} \left(t_2 - t_2 + \frac{t_2}{3} \right) = \frac{u^2}{Z} \left(\frac{t_2}{3} \right)$$

u = jännitteen maksimiarvo

P = teho

t = aika

Z = aaltoimpedanssi

LIITE 4

Laitevalmistajan tiedot eräästä puoliventtiilisuojusta.

Raychem

PolyGarde

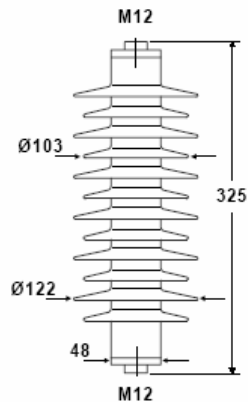
Surge Arrester Systems

Metal oxide arrester
Polymeric Housing
IEC 99-4
Nominal discharge current: 10 kA
Line discharge class 1
High current impulse 4/10 μ s: 100 kA
Energy absorption capability at
– High current imp.: 4,5 kJ/kV U_c
– Line discharge imp.: 2,3 kJ/kV U_c

Continuous operating voltage
 U_c : 15 kV
Rated voltage
 U_r : 18 kV
Outdoor application
Rated short circuit current: 20 kA

HDA-15NA- ☐ ☐ ☐

Dimensions



Arrester Housing

Cantilever strength*	Nm	350
Pull strength*	N	1000
Max. Torque M12*	Nm	50
Impulse voltage 1,2/50 μ s	kV	184
Power frequency voltage - wet:	kV	56
Flashover distance	mm	320
Creepage length	mm	815
Weight	kg	3,0

Accessories

Mounting	<input type="checkbox"/>
Ground Lead	<input type="checkbox"/>
Line Lead	<input type="checkbox"/>

*according to DIN 48113

LIITE 5

Odotusarvo salamaniskujen määrälle eri salamavirroilla, iskuetäisyyksillä ja salamaniskutiheyksillä. Harmaalla kipinävälin syttymisjännitteen ylittävät parametrit.

SÄHKÖASEMA A

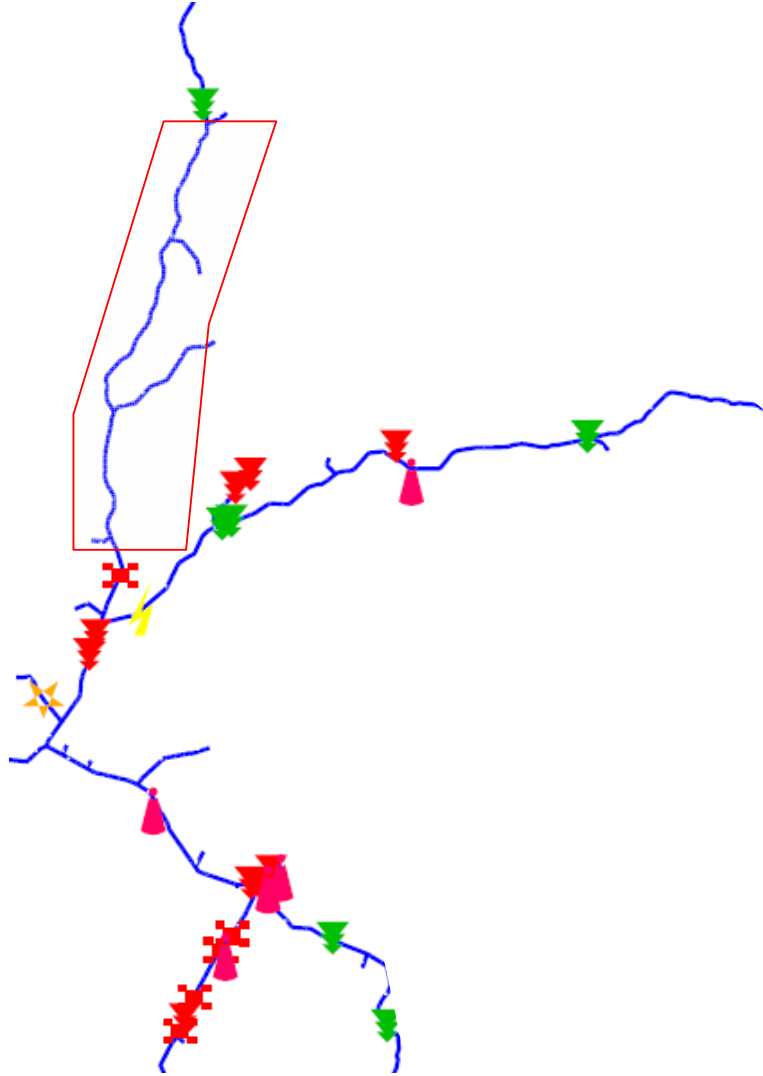
Salamavirran amplitudi [kA]	Salamavirran todennäköisyys [%]	Todennäköisyys salaman iskemisestä eri lohkolle [%]						
		14.29	14.29	14.29	14.29	14.29	14.29	14.29
5	97	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53
10	92	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
15	85	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47	0.47
20	80	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44	0.44
25	65	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
30	60	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
35	45	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
40	35	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
45	30	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
50	25	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
55	22	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
60	20	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
65	15	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
70	12	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
75	9	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
80	8	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
85	7	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
90	5	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
95	4	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
100	3	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

SÄHKÖASEMA B

Salamavirran amplitudi [kA]	Salamavirran todennäköisyys [%]	Todennäköisyys salaman iskemisestä eri lohkolle [%]						
		14.29	14.29	14.29	14.29	14.29	14.29	14.29
5	97	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82
10	92	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78
15	85	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72	0.72
20	80	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
25	65	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55
30	60	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
35	45	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38
40	35	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
45	30	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
50	25	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21
55	22	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
60	20	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
65	15	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
70	12	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
75	9	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
80	8	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07
85	7	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
90	5	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
95	4	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
100	3	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03

LIITE 6

Pysyvien vikojen jakautuminen metsässä sekä tien varressa.



Kuva 1. Eräällä lähdöllä tapahtuneet pysyvät viat eri symbolein. Punaisella rajattu alue, jossa ympäristöolosuhteena on tienvarsi. Kyseisellä alueella ei ole tapahtunut ainuttakaan pysyvää vikaa.

LIITE 7

Häiriöraporttipohja pysyvälle vialle.

HÄIRIÖILMOITUS

Vastuualue(kunta)	vuosi	kuu	Käsittelijä	Pvm	Nimi
Asiakasilmoitus vast.otettu	päivä	klo	Laatija		
		klo	Täydentäjä		
Häiriö selvitetty	päivä		Tarkastaja		

VIAN SIJAINTI

<input type="checkbox"/> 110/45 kV verkko	Sähkösanoma	<input type="checkbox"/> nro	Muuntopiiri (Jakopiiri)						
<input type="checkbox"/> 20 kV verkko			Sulakeryhmä						
<input type="checkbox"/> 10 kV verkko	Lähtö	<input type="checkbox"/> nro							
<input type="checkbox"/> 0,4 kV verkko	TYÖKOHDDE erotinväli tai muuntamo(t)		Vanha sulake						
<input type="checkbox"/> Sähköasema			Uusi sulake						
Jakorajat ennen häiriötä									

Omassa verkossa		Asiakkaalla verkossa	
<input type="checkbox"/> Johdolla	<input type="checkbox"/> Jakeluununtamo	<input type="checkbox"/> Liittymisjohto	
<input type="checkbox"/> Avojohto	<input type="checkbox"/> Sähköasema	<input type="checkbox"/> Pääkeskus	
<input type="checkbox"/> Riippukaapeli	<input type="checkbox"/> Tuntematon	<input type="checkbox"/> Mittari/Melko	
<input type="checkbox"/> Maakaapeli	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

VIAN AIHEUTTAJA

<input type="checkbox"/> Ukkonen	<input type="checkbox"/> Eläinten tuottamus	<input type="checkbox"/> Asennus- tai suunnitteluvirhe
<input type="checkbox"/> Lumi- ja jääkuorma	<input type="checkbox"/> Varomaton puunkaato	<input type="checkbox"/> Hoitovika
<input type="checkbox"/> Lumikuorman kaatama puu	<input type="checkbox"/> Maankaivu	<input type="checkbox"/> Ylikuorma
<input type="checkbox"/> Tuuli/myrsky	<input type="checkbox"/> Muu ulkopuol. varomattomuus	<input type="checkbox"/> Rakenne tai materiaalit
<input type="checkbox"/> Muut sääolosuhteet	<input type="checkbox"/> Ilkivalta	<input type="checkbox"/> Tuntematon
<input type="checkbox"/> Käyttövire	<input type="checkbox"/>	

SUOJAUKSEN TOIMINTA

VIAN LAATU

SJ-verkko	PJ-verkko	<input type="checkbox"/> Maansulku
<input type="checkbox"/> Viallisen lähdön katk. laukesi	<input type="checkbox"/> Ryhmäsulake palanut	<input type="checkbox"/> Kaksoismaasulku
<input type="checkbox"/> Terveen lähdön katk. laukesi	<input type="checkbox"/> Välisulake palanut	<input type="checkbox"/> Oikosulku
<input type="checkbox"/> 20 kV syöttökatk. laukesi	<input type="checkbox"/> Asemasuojakytkin lauennut	<input type="checkbox"/> Ei todettu vikaa, tuntematon
<input type="checkbox"/> 110 kV katkaisija laukesi	<input type="checkbox"/> Pääsulake	
<input type="checkbox"/> Mikään katkaisija ei lauennut	<input type="checkbox"/> Ei toiminut	

<input type="checkbox"/> Ei hav. vaurioita	Vian aikatiedot	1. Etsintäaika	, h
<input type="checkbox"/> Vaurioselvitys kääntöpuolella		2. Korjausaika	, h

KYTKINLAITE TAI JÄNNITTEETÖN ALUE	AUKI Pv klo	KIINNI Pv klo	HUOMAUTUKSET